



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO REFORÇADO COM FIBRAS SUBMETIDAS A
CORROSÃO ACELERADA POR IMERSÃO MODIFICADA**

Rodrigo Conzatti Lanzini

Lajeado, Novembro de 2019

Rodrigo Conzatti Lanzini

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO REFORÇADO COM FIBRAS SUBMETIDAS A
CORROSÃO ACELERADA POR IMERSÃO MODIFICADA**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade do Vale do Taquari UNIVATES, como exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Débora Pedroso Righi

Lajeado, Novembro de 2019.

RESUMO

A corrosão do aço em estruturas de concreto armado é um grave problema que atinge muitas edificações, diminuindo a sua vida útil. Visando buscar soluções para minimizar esse problema, este estudo busca avaliar a utilização de fibras metálicas e de polipropileno como reforço do concreto armado. O ensaio baseia-se na imersão das estruturas em uma solução de cloretos e na aplicação de uma diferença de potencial, através de ligação das mesmas a uma fonte de energia, simulando desta forma ambiente altamente agressivo, durante um período de 30 dias. Foram moldadas 6 vigas de concreto armado, duas com o reforço de fibras metálicas, duas com reforço de fibra de polipropileno e duas de concreto convencional. Para cada tipo de concreto uma viga foi submetida ao ensaio de CAIM. As estruturas foram moldadas com dimensões de 100 x 15 x 15 cm e com uma armadura positiva de duas barras de 8mm. Após os 30 dias, com três vigas no processo de corrosão e três em cura úmida, elas foram rompidas através do ensaio de flexão a 4 pontos, para comparativo da perda de resistência das estruturas com e sem corrosão. A viga com concreto convencional apresentou uma perda de 13% após o ensaio de corrosão, a estrutura de concreto reforçado com fibra de polipropileno resultou em uma perda de resistência de 24%, já a reforçada com fibra metálica teve uma perda de 5% de sua resistência à tração. Os resultados obtidos demonstram que a adição de fibra metálica teve resultados positivos para diminuir a corrosão, já a adição de fibra de polipropileno demonstrou uma menor eficiência que o concreto convencional utilizado como referência.

Palavras-chave: Concreto Armado. Fibras. Corrosão. CAIM.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Pilar atacado por sulfatos | 18 |
| Figura 2 - Viga atacada por sulfatos | 18 |
| Figura 3 - Pilar corroído por cloretos | 19 |
| Figura 4 - Pilar de 10 anos construído sobre o mar | 20 |
| Figura 5 - Tipos de corrosão eletroquímica | 21 |
| Figura 6 - Corrosão das armaduras | 23 |
| Figura 7 - Modelo do ensaio de CAIM | 24 |
| Figura 8 - Fibras de polipropileno tipo monofilamento | 27 |
| Figura 9 - Fibras de polipropileno tipo fibrilada | 27 |
| Figura 10 - Geometria das fibras | 29 |
| Figura 11 - Resistência à tração pelo consumo de fibras | 30 |
| Figura 12 - Tenacidade do concreto com fibras | 31 |
| Figura 13 - Perda de massa da armadura | 32 |
| Figura 14 - Fluxograma dos ensaios | 34 |
| Figura 15 - Fibra metálica utilizada | 41 |
| Figura 16 - Fibra de polipropileno utilizada | 41 |
| Figura 17 - Corpos de prova e vigas moldados | 42 |
| Figura 18 - Detalhamento da armadura | 44 |
| Figura 19 - Processo de montagem das armaduras | 44 |
| Figura 20 - Armaduras finalizadas | 45 |
| Figura 21 - Relação água cimento/resistência à compressão | 46 |
| Figura 22 - Adensamento do concreto | 49 |
| Figura 23 - Vigas colocadas para início do ensaio | 50 |
| Figura 24 - Fonte de tensão utilizada no ensaio | 51 |
| Figura 25 - Ligação das vigas à fonte de energia | 51 |
| Figura 26 - Posicionamento do fio de cobre na armadura | 52 |
| Figura 27 - Andamento do ensaio de CAIM | 53 |
| Figura 28 - Modelo de flexão à 4 pontos | 54 |
| Figura 29 - Ensaio de flexão a quatro pontos | 54 |
| Figura 30 - Análise da perda de seção da armadura | 56 |

| | |
|--|----|
| Figura 31 - Ensaio de resistência à compressão | 57 |
| Figura 32 - Ensaio de abatimento de tronco de cone..... | 58 |
| Figura 33 - Concreto convencional sem corrosão | 66 |
| Figura 34 - Concreto convencional com corrosão | 66 |
| Figura 35 - Concreto com fibra de polipropileno sem corrosão..... | 67 |
| Figura 36 - Concreto com fibra de polipropileno com corrosão | 67 |
| Figura 37 - Concreto com fibra de aço sem corrosão..... | 67 |
| Figura 38 - Concreto com fibra de aço com corrosão | 67 |
| Figura 39 - Mapeamento de fissuras - concreto convencional | 68 |
| Figura 40 - Mapeamento de fissuras - concreto com fibra de polipropileno..... | 69 |
| Figura 41 - Mapeamento de fissuras - concreto com fibra metálica | 69 |
| Figura 42 – Armadura do concreto convencional após a corrosão | 70 |
| Figura 43 - Armadura do concreto com fibra de polipropileno após a corrosão..... | 70 |
| Figura 44 - Armadura do concreto com fibra metálica após a corrosão..... | 71 |
| Figura 45 - Avanço da corrosão - Concreto convencional | 72 |
| Figura 46 - Avanço da corrosão - Concreto com fibra de polipropileno..... | 72 |
| Figura 47 - Avanço da corrosão - Concreto com fibra metálica | 73 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Relação entre classe de agressividade e qualidade do concreto | 14 |
| Tabela 2 - Cobrimento mínimo das estruturas..... | 15 |
| Tabela 3 - Propriedades das fibras..... | 26 |
| Tabela 4 - Classificação e propriedades das fibras de aço | 29 |
| Tabela 5 - Características do aço..... | 43 |
| Tabela 6 - Consumo de água em l/m ³ | 46 |
| Tabela 7 - Volume do agregado graúdo seco | 47 |
| Tabela 8 - Traços unitários | 48 |
| Tabela 9 - Consumo de materiais | 48 |
| Tabela 10 - Relação Teor de aditivo/abatimento de tronco de cone | 59 |
| Tabela 11 - Resistência à tração na flexão | 65 |
| Tabela 12 - Perda de seção média das barras | 71 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Agressividade dos ambientes | 14 |
| Quadro 2 - Causas da deterioração do concreto armado. | 16 |
| Quadro 3 - Características do cimento CP V | 35 |
| Quadro 4 - Caracterização da areia..... | 38 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 - Corrosão das armaduras pelo tempo | 21 |
| Gráfico 2 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo..... | 37 |
| Gráfico 3 - Limites da composição granulométrica do agregado graúdo..... | 39 |
| Gráfico 4 - Resistência à compressão..... | 59 |
| Gráfico 5 - Resistência à tração na flexão | 61 |
| Gráfico 6 - Resistência à tração na flexão das vigas submetidas a corrosão..... | 62 |
| Gráfico 7 - Resistência à tração na flexão das vigas com concreto convencional | 63 |
| Gráfico 8 - Resistência à tração na flexão das vigas de concreto reforçado com fibras de polipropileno..... | 64 |
| Gráfico 9 - Resistência à tração na flexão das vigas de concreto reforçado com fibras metálicas | 64 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 8 |
| 1.1 Objetivos..... | 9 |
| 1.1.1 Objetivo geral | 9 |
| 1.1.2 Objetivos específicos..... | 9 |
| 1.2 Justificativa..... | 10 |
| 1.3 Delimitações | 10 |
| 1.4 Estrutura do trabalho | 11 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 12 |
| 2.1 Vida útil da estrutura | 12 |
| 2.1.1 Durabilidade da estrutura | 13 |
| 2.1.2 Agressividade do ambiente..... | 13 |
| 2.2 Deterioração das estruturas..... | 15 |
| 2.2.1 Causas químicas | 17 |
| 2.2.3 Causa eletroquímica e corrosão das armaduras..... | 20 |
| 2.3 Corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM) | 23 |
| 2.4 Composição do concreto | 25 |
| 2.4.1 Tipos de fibras | 25 |
| 2.4.2 Características do concreto com fibras..... | 30 |
| 2.5 Estudos realizados | 32 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 34 |
| 3.1 Materiais | 35 |
| 3.1.1 Cimento | 35 |
| 3.1.2 Agregado miúdo | 36 |
| 3.1.3 Agregado graúdo | 38 |

| | |
|---|----|
| 3.1.4 Água de amassamento | 39 |
| 3.1.5 Aditivo | 40 |
| 3.1.6 Fibra metálica | 40 |
| 3.1.7 Fibra de polipropileno | 41 |
| 3.2 Estratégia de pesquisa..... | 42 |
| 3.3 Montagem da armadura | 43 |
| 3.4 Dosagem do concreto | 45 |
| 3.5 Caracterização dos materiais | 49 |
| 3.5.1 Ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM)..... | 50 |
| 3.5.2 Resistência à flexão a 4 pontos..... | 53 |
| 3.5.3 Mapeamento de fissuras | 55 |
| 3.5.4 Perda de massa da armadura..... | 55 |
| 3.5.5 Resistência à compressão | 56 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 58 |
| 4.1 Abatimento de tronco de cone | 58 |
| 4.2 Resistência à compressão | 59 |
| 4.3 Corrosão acelerada por imersão modificada | 60 |
| 4.3.1 Resistência à tração na flexão..... | 61 |
| 4.3.2 Mapeamento das fissuras..... | 66 |
| 4.3.3 Perda de massa | 70 |
| 5 CONCLUSÕES | 74 |
| REFERÊNCIAS | 76 |

1 INTRODUÇÃO

Na construção civil a corrosão é um perigoso processo que ameaça constantemente as estruturas, devido a isto ela é considerada um dos mais sérios fenômenos patológicos na área da engenharia civil. Uma estrutura afetada por corrosão, acaba alterando suas características de projeto, afetando a sua durabilidade e desempenho. Para que a estrutura não sofra com a corrosão, são necessárias intervenções que farão com que ela cumpra com seu propósito (TORRES, 2006).

De acordo com Clifton (1993) apud Isaia (2011) há uma tendência mundial que busca prolongar a vida útil das estruturas de concreto armado e aumentar a sua durabilidade. O autor cita que isso ocorre devido ao crescente número de casos de estruturas com problemas de degradação precoce e as novas necessidades e exigências de sustentabilidade da área. Requisitos como vida útil, durabilidade e desempenho são abordados nas NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 15575 (ABNT, 2013).

No Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais da URGs (LEME), um modelo de ensaio baseado na imersão em solução de cloreto de corpos de prova de concreto armado, vem sendo utilizado. O método utiliza uma diferença de potencial aplicada entre o aço e a solução, estimulando a migração dos íons cloreto. Ao final do ensaio é possível verificar a perda de massa da armadura metálica (GRAEFF, 2007).

Conforme Figueiredo (2000) os primeiros estudos em concreto reforçado com fibras foram realizados nos Estados Unidos em meados de 1971, visando a sua utilização comercial. Estas pesquisas resultaram em um melhor entendimento das características deste tipo de

concreto, seus mecanismos de dano e fratura, sendo possível desta forma identificar as características das fibras para determinadas aplicações.

A utilização de fibras no concreto faz com que o mesmo melhore sua resistência à abrasão e tração na flexão e passe a apresentar característica pseudo-dúctil. Para que propriedades como a ductilidade, a resistência mecânica, o controle de fissuras e a abrasão do concreto sejam atingidas, é preciso se ter a escolha do tipo correto de fibra (GUIMARÃES, 2010). Como principais melhorias do concreto reforçado com fibras, Garcez (2005) cita o aumento da tenacidade e da resistência à tração. Ainda há uma lacuna de poucos estudos quando se referem a esta nova classe de concretos com fibras quando submetidos à corrosão, devido a isso este estudo visa proporcionar uma pequena contribuição para que este comportamento seja estudado.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem por objetivo geral analisar o comportamento mecânico de vigas de concreto armado reforçadas com fibras metálicas e de polipropileno quando submetidas ao processo de corrosão acelerada por imersão modificada.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Verificar a resistência à flexão após a exposição ao método CAIM, para avaliar a influência da fibra nas propriedades mecânicas após a corrosão da viga;
- avaliar a perda de massa da armadura positiva e a fissuração dos concretos após a realização do ensaio de CAIM;

- verificar a resistência à compressão dos concretos elaborados, para verificar a influência do tipo de fibra nesta propriedade.

1.2 Justificativa

Para que se possa combater a corrosão, estudos que visem combater esta patologia e propor soluções devem ser aprofundados. Soluções que alterem a composição e geometria do concreto, ou então medidas elétricas passivantes e películas protetoras na superfície do aço ou do concreto, são medidas que devem ser testadas e qualificadas. Toda medida proposta deve ter eficiência testada e seus dados validados, sendo aplicada a diferentes concretos (TORRES, 2006).

Através do ensaio eletroquímico de corrosão acelerada por imersão modificada é possível avaliar a corrosão que determinada solução tem perante uma estrutura de concreto armado, simulando um ambiente agressivo à estrutura. Este ensaio possibilita analisar a corrosão de forma visual, com a sua evolução nas armaduras durante o ensaio, e uma análise quantitativa, através da perda de massa da armadura (GRAEFF, 2007).

1.3 Delimitações

Esta pesquisa estará delimitada a realizar os ensaios de corrosão acelerada por imersão modificada e de flexão a 4 pontos em vigas de concreto armado reforçadas com fibras. Também serão realizados os ensaios em uma viga com concreto convencional como referência. Todos os concretos desenvolvidos serão testados à compressão através de moldagem e rompimento de corpos de prova.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho será dividido em cinco capítulos, sendo introdução, revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e conclusão. Neste primeiro capítulo é realizada uma introdução, apresentando as características do tema a ser desenvolvido, além de seus objetivos, justificativa e delimitação do tema.

No segundo capítulo é realizada uma revisão bibliográfica abordando conhecimentos teóricos que envolvem o tema estudado. No terceiro capítulo será feito um programa experimental, demonstrado os métodos e materiais utilizados, para que seja possível atingir os objetivos desta monografia. No quarto capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos e no quinto capítulo será realizado um fechamento da pesquisa com uma conclusão sobre o trabalho realizado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Vida útil da estrutura

Entende-se por vida útil de uma estrutura de concreto armado o período de tempo que ela se mantém com as suas características iniciais, livre de intervenções. Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014) dentro de uma estrutura sua vida útil poderá variar ao longo da mesma, sendo preciso ter atenção especial com determinadas partes, que terão um valor de vida útil diferenciado do todo.

A vida útil de uma estrutura é dividida pelos seguintes conceitos: vida útil de projeto, vida útil de serviço, vida útil última e vida útil residual. A vida útil de projeto é o período de tempo em que a carbonatação ou a frente de cloretos demora para atingir a armadura, a vida útil de serviço é o tempo que a estrutura demora para começar a aparecer manchas superficiais, ou o surgimento de fissuras, ou o destacamento do concreto de cobrimento. A vida útil última é o período de tempo que leva até a estrutura ir a colapso parcial ou total e a vida útil residual é o tempo em que a estrutura ainda consegue desempenhar suas funções (ISAIA, 2011).

2.1.1 Durabilidade da estrutura

A durabilidade é a capacidade do concreto em resistir a ambientes agressivos, como ataques físicos e químicos, ações de intemperismo e processos de deterioração. A função do concreto é permanecer durante toda a sua vida útil com o mínimo de deteriorações possíveis, evitando danos a estrutura e gastos com manutenção desnecessários (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Quanto maior a impermeabilidade, maior a durabilidade; um concreto com baixa permeabilidade dificulta a entrada de agentes agressivos no seu interior. A durabilidade é uma propriedade que não possui nenhum método padronizado para a sua avaliação, sendo que a sua única forma de controle é o acompanhamento das estruturas (AÏTCIN, 2000).

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) a durabilidade da estrutura deverá ser definida antes do início da elaboração do projeto. Esta decisão será tomada após a análise das influências ambientais na estrutura, que será definida entre contratante e projetista estrutural. A estrutura de concreto deverá fornecer ao seu usuário segurança e conforto durante o período que corresponde a sua vida útil.

Conforme Isaia (2011), a durabilidade de uma estrutura depende dos seguintes fatores: a resistência da própria estrutura, a resistência da armadura e a resistência do concreto. A estrutura estará comprometida quando algum destes fatores apresentar algum tipo de falha. A durabilidade da estrutura de concreto dependerá também da agressividade do meio, devendo ser conhecido, avaliado e classificado o grau de agressividade do ambiente.

2.1.2 Agressividade do ambiente

Diversos fatores ligados ao meio em que estão inseridas irão influenciar na vida útil da estrutura, como a ação do vento, do sol, chuva ácidas, ação de sulfatos e cloretos de ambientes marinhos. A permeabilidade e absorção do concreto permite que estes fatores cheguem a parte

interna da estrutura, que serão responsáveis na maioria dos casos pela degradação das estruturas de concreto (SACIOTO, 2005).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define a agressividade do meio e o risco de deterioração das estruturas conforme o ambiente externo. A norma explica que o grau de agressividade do meio ambiente está ligado a ações químicas e físicas que atacam o concreto, as variações térmicas que causam alterações no volume da estrutura, as ações mecânicas e a retração hidráulica não têm influência nesta classificação. No Quadro 1 é possível visualizar as quatro classes de agressividades com os seus respectivos ambientes.¹

Quadro 1 - Agressividade dos ambientes

| Classe de agressividade ambiental | Agressividade | Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto | Risco de deterioração da estrutura |
|-----------------------------------|---------------|--|------------------------------------|
| I | Fraca | Rural Submersa | Insignificante |
| II | Moderada | Urbana | Pequeno |
| III | Forte | Marinha Industrial | ‘Grande |
| IV | Muito forte | Industrial Respingos de maré | Elevado |

Fonte: Adaptado pelo autor com base na NBR 6118 (ABNT 2014, p. 16).

Através das classes de agressividade, é possível com o Tabela 1, da NBR 6118 (ABNT, 2014) vincular a agressividade do ambiente com a qualidade do concreto. A norma estipula a relação água/cimento e a classe do concreto para estruturas de Concreto Armado (CA) ou de Concreto Protendido (CP).

Tabela 1 - Relação entre classe de agressividade e qualidade do concreto

| Concreto | Tipo | Classe de Agressividade | | | |
|------------------------------------|------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | I | II | III | IV |
| Relação água/cimento em massa | CA | $\leq 0,65$ | $\leq 0,60$ | $\leq 0,55$ | $\leq 0,45$ |
| | CP | $\leq 0,60$ | $\leq 0,55$ | $\leq 0,50$ | $\leq 0,45$ |
| Classe do concreto (ABNT NBR 8953) | CA | $\geq C20$ | $\geq C25$ | $\geq C30$ | $\geq C40$ |
| | CP | $\geq C25$ | $\geq C30$ | $\geq C35$ | $\geq C40$ |

Fonte: Adaptado pelo autor com base na NBR 6118 (ABNT 2014, p. 16).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) também define os cobrimentos mínimos de lajes, pilares, vigas e estruturas de concreto protendido (TABELA 2), conforme a classe de agressividade do meio.

Tabela 2 - Cobrimento mínimo das estruturas

| Tipo de estrutura | Componente ou elemento | Classe de agressividade ambiental | | | |
|---------------------|------------------------|-----------------------------------|----|-----|----|
| | | Cobrimento nominal (mm) | | | |
| | | I | II | III | IV |
| Concreto Armado | Laje | 20 | 25 | 35 | 45 |
| | Viga/Pilar | 25 | 30 | 40 | 50 |
| Concreto protendido | Todos | 25 | 25 | 40 | 50 |

Fonte: Adaptado pelo autor com base na NBR 6118 (ABNT 2014, p. 20).

2.2 Deterioração das estruturas

Para que um concreto tenha elevada durabilidade é essencial que ele seja impermeável. Um concreto com alta permeabilidade permite a entrada de agentes externos, que levam a corrosão das armaduras. Um concreto com características mecânicas boas não necessariamente formará uma estrutura resistente à corrosão, pois a deterioração dificilmente acontece de forma isolada, um único fator adverso pode causar a sua deterioração (RIBEIRO *et al.*, 2002).

O concreto se torna poroso devido aos vazios presentes em seu interior, sendo que suas origens podem ser devido a diversas causas, como erros de dosagem, incorporação de ar durante a mistura dos materiais, excesso de água na mistura, erros na mistura dos materiais, entre outros. O concreto se torna permeável a líquidos e gases com a interligação destes vazios (BAUER, 2008).

Santos (2012) cita quatro causas como as responsáveis pela redução da vida útil das estruturas, que são divididas pela sua natureza em: mecânicas, físicas, químicas e eletroquímicas. Para que seja possível prevenir ou reparar estruturas é indispensável saber a natureza da sua deterioração. No Quadro 2 são listadas as causas de deterioração, com as suas causas, sintomas e mecanismos afetados.

Quadro 2 - Causas da deterioração do concreto armado.

| Quadro 2 – Causas da deterioração do concreto armado. | | | | |
|---|---|-----------------------|---|---|
| Causas | Mecanismos | | Sintomas | Afeta |
| Mecânica | Choques e impactos. | | Fissuração e lascamento do concreto; possível perda de armadura. | Peças estruturais (Concreto + armadura) |
| | Recalque diferencial das fundações | | | |
| | Agentes imprevisíveis | | | |
| Física | Desgaste superficial | Atrito | Desgaste superficial do concreto | Concreto |
| | | Cavitação | | |
| | Cristalização de sais nos poros do concreto | | Fissuração e escamamento do concreto | Concreto |
| | Retração hidráulica do concreto fresco | Assentamento plástico | Fissuração do concreto | Concreto |
| | | Retração plástica | | |
| | Gradiente térmico | Retração térmica | Fissuração do concreto | Concreto |
| | | Dilatação térmica | | |
| | Ação do fogo | | Fissuração; desidratação da pasta de cimento; expansão dos agregados; desagregação do concreto; ruptura e colapso | Peças estruturais (Concreto + armadura) |
| Química | Reação Álcali-agregado | | Expansão e fissuração do concreto | Concreto |
| | Hidratação dos óxidos do cimento | | | |
| | Ataque por sulfatos | | Decomposição química da pasta; despassivação do aço; fissuração; desintegração; e perda de resistência | Concreto |
| | Ataque por ácidos | | Decomposição química, dissolução e lixiviação, ou decomposição química, expansão, fissuração e desagregação do concreto | Concreto |
| | Água pura | | Decomposição química; dissolução e lixiviação da pasta de cimento, eflorescências, estalactite e estalagmite | Concreto |
| | Carbonatação | | Redução progressiva do pH do concreto e despassivação do aço, abrindo caminho para a corrosão do aço | Inicialmente concreto e depois o aço |
| | Ataque por cloretos | | Despassivação do aço; posteriormente, corrosão das armaduras (processo eletroquímico) | Inicialmente aço e depois concreto |
| Eletroquímica | Corrosão das armaduras | | Deterioração e perda de seção do aço; perda de aderência aço-concreto; fissuração e lascamento do concreto | Inicialmente aço e depois concreto |

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Santos (2012, p.10).

2.2.1 Causas químicas

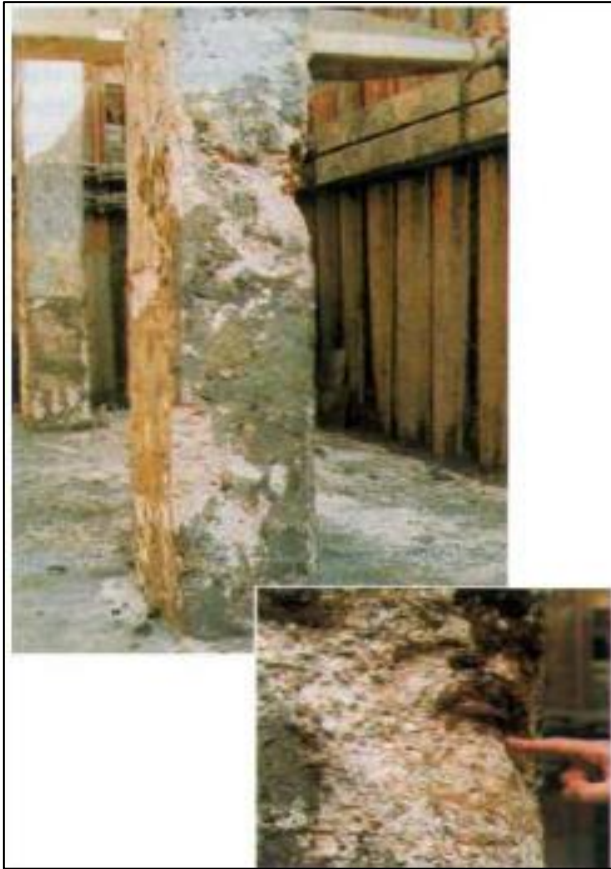
O destacamento do concreto, fissurações, diminuição de sua resistência, aumento da porosidade e permeabilidade são efeitos físicos ocasionados pelas reações químicas visíveis em estruturas de concreto. Essas degradações podem ser causadas devido a reações externas à estrutura, são agentes externos que reagem com a pasta de cimento, ou internamente, como formações de compostos expansivos do cimento e reações álcali-agregado (POGGIALI, 2009).

2.2.1.1 Ataque por sulfatos

O sulfato é um dos agentes mais agressivo às estruturas de concreto. Ele é encontrado em águas de chuvas, do mar, lençóis freáticos, em solos e em efluentes industriais e sanitários. Os principais sulfatos encontrados no meio são: sulfato de cálcio; sulfato de potássio; sulfato de amônia; sulfato de magnésio; e sulfato de sódio. Todos os tipos de sulfatos podem causar danos ao concreto de cimento *Portland*, devido a causarem a decomposição química do aluminato de tricálcio e do hidróxido de cálcio, presentes na pasta de cimento. Além dos ambientes externos, os sulfatos também podem estar presentes no cimento, nas adições, nos agregados e na água de amassamento (COSTA, 2004).

Conforme Santos (2012) as estruturas mais atacadas pela ação de sulfatos são as estruturas marinhas, as tubulações de esgotos, as fundações e as demais estruturas que entram em contato com águas e solos contaminados. Por característica, o concreto quando atacado por sulfatos tende a ficar com uma aparência esbranquiçada, posteriormente ocorrendo o aparecimento de fissuras devido à formação de elementos expansivos no seu interior, podendo ocasionar o deslocamento do concreto e a perda de resistência. Nas Figuras 1 e 2 é possível visualizar estruturas de concreto armado atacadas por sulfatos.

Figura 1 - Pilar atacado por sulfatos



Fonte: Santos (2012)

Figura 2 - Viga atacada por sulfatos



Fonte: Santos (2012)

2.2.1.2 Ataque por cloretos

Cloretos são agentes extremamente agressivos ao aço presente nas estruturas de concreto armado. Eles causam a despassivação da armadura e possuem grande participação na corrosão das barras metálicas. Os íons cloretos entram no concreto através de impurezas nos agregados, na água de amassamento, nos aditivos, através de atmosferas marinhas e processos industriais (CASCUDO, 1997).

Cavalcanti Filho (2010) cita como principais meios de infiltração de cloretos no concreto a permeabilidade sob pressão hidráulica, a difusão iônica e a absorção capilar. A permeabilidade sob pressão hidráulica ocorre devido à presença de um gradiente hidráulico que realiza uma pressão para a entrada da água e impurezas na estrutura. A difusão iônica se desenvolve no interior do concreto, ocasionada pela diferença de concentração iônica dentro do concreto, que possibilita a movimentação de íons cloretos em seu interior. A absorção capilar ocorre na superfície do concreto, ocasionada pelo contato de soluções com íons cloretos com a superfície do concreto, a qual penetra no concreto através de seus poros.

Nas Figuras 3 e 4 são apresentados dois pilares com características de ataque por cloretos. Conforme Aguiar (2006), na Figura 4 apresenta-se um pilar de 10 anos construído sobre o mar, com sinais de corrosão por cloretos e carbonatação.

Figura 3 - Pilar corroído por cloretos



Fonte: Santos (2012)

Figura 4 - Pilar de 10 anos construído sobre o mar

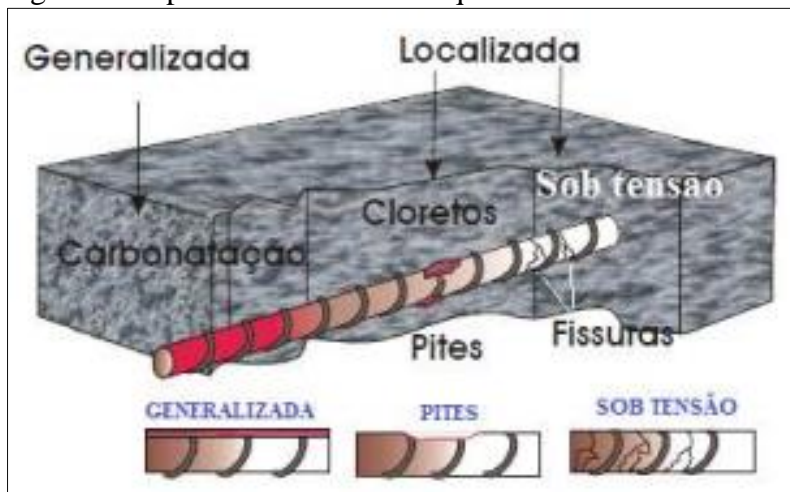


Fonte: Aguiar (2006)

2.2.3 Causa eletroquímica e corrosão das armaduras

A corrosão eletroquímica, também conhecida como corrosão aquosa, é o tipo de corrosão que efetivamente causa problemas à construção civil. Cascudo (1997) classifica a corrosão eletroquímica em três categorias: a corrosão generalizada, que ocorre em toda superfície do metal, a corrosão por pite, que ocorre de forma localizada, causando desgastes na superfície do metal, e a corrosão sob tensão fraturante, que também acontece de forma localizada, mas causando fissuras na estrutura metálica. Na Figura 5 são apresentados os tipos de corrosão eletroquímica. Aguiar (2006) ainda cita um quarto tipo de corrosão aquosa, a corrosão galvânica, ou bimetálica, que ocorre no contato entre dois metais diferentes no interior da estrutura, sendo que sofrerá corrosão aquele com menor atividade eletroquímica.

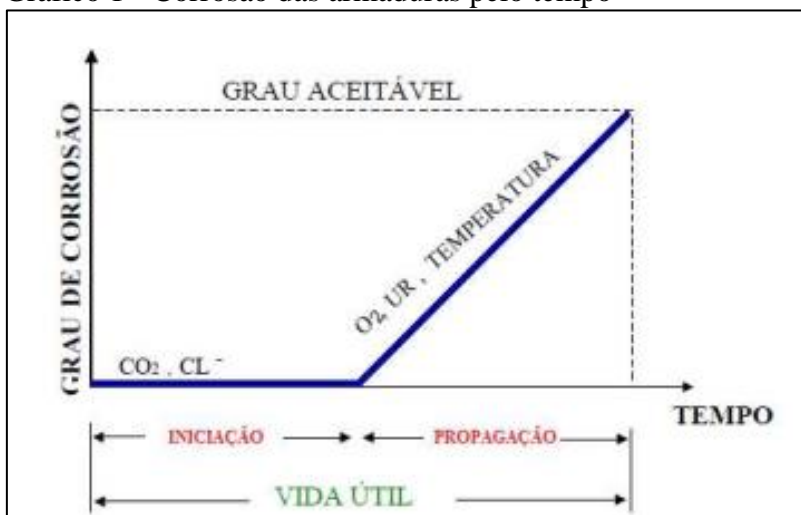
Figura 5 - Tipos de corrosão eletroquímica



Fonte: Cascudo (1997).

A corrosão das armaduras é dividida em dois processos, a iniciação e a propagação. A primeira é baseada no tempo em que os agentes agressivos demoram para atingir a armadura, já a segunda considera a propagação da corrosão na armadura (TUUTTI, 1982). No Gráfico 1 é apresentada uma relação do grau de corrosão, pelo tempo e pela vida útil da estrutura, dividindo as etapas de iniciação e propagação da corrosão.

Gráfico 1 - Corrosão das armaduras pelo tempo



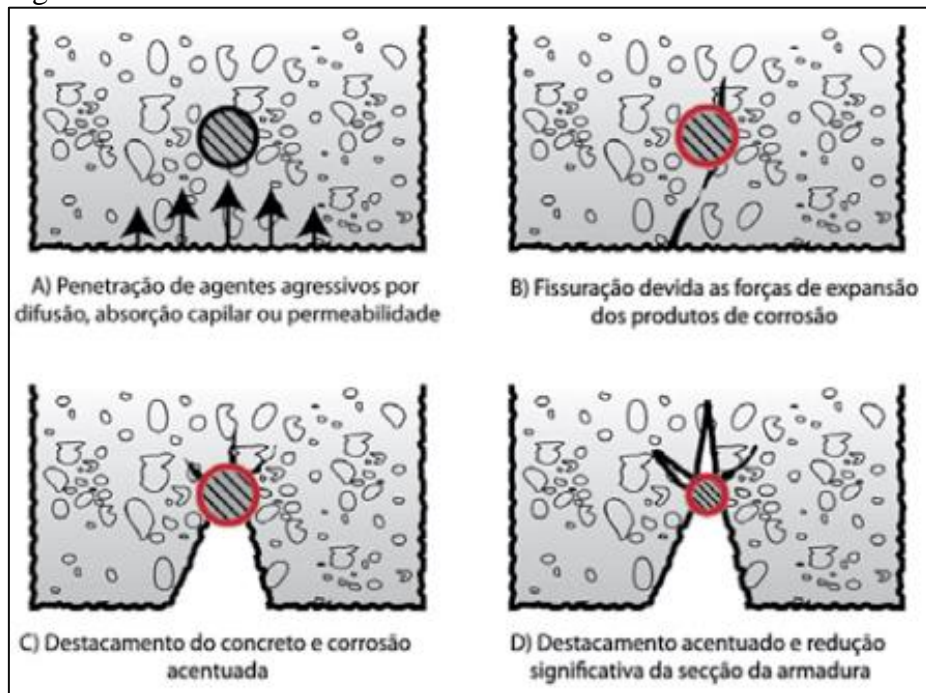
Fonte: Tuutti (1982).

A partir do momento em que ocorre a despassivação da armadura, seja por carbonatação ou pela ação deletéria dos cloretos, a estrutura passa a ficar vulnerável à corrosão eletroquímica. Silva (2006) explica que a pilha de corrosão do aço, igual a qualquer outra célula eletroquímica, é formada por um cátodo, um ânodo, um eletrólito, um condutor metálico e uma diferença entre as zonas catódicas e anódicas.

Conforme Santos (2012) a propagação da corrosão aquosa se dá devido a diversos fatores: o condutor metálico, que é a armadura da estrutura; a diferença de potencial, que pode acontecer devido a variações de umidade, concentrações salinas diferenciadas, solicitações mecânicas agindo de formas distintas no aço e no concreto e a carbonatação; o eletrólito, que é a umidade presente nos poros do concreto, essa solução contém agentes que irão possibilitar a movimentação de elétrons ao longo da armadura; o oxigênio, que é fator essencial para que ocorra a corrosão, quando dissolvido no eletrólito; agentes agressivos, que diminuem a alcalinidade do concreto, facilitam a despassivação do aço e aumentam a condutividade elétrica do concreto; o ânodo, região em que o metal fica corroído; e o catodo, região não corroída do metal.

Devido à corrosão do aço, cria-se uma crosta no entorno das barras composta por materiais oriundos da corrosão eletroquímica (CASCUDO, 1997). De acordo com Polito (2006), os materiais que formam esta crosta são altamente expansivos, podendo ocupar volumes de três a dez vezes maior que o seu volume original, gerando elevadas pressões internas. Essas pressões irão gerar fissuras no concreto e até o destacamento da camada de revestimento, causando a exposição da armadura, conforme Figura 6.

Figura 6 - Corrosão das armaduras



Fonte: Isaia (2011)

A corrosão das barras de metal também irá causar a perda de aderência entre o aço e o concreto, devido à perda de seção das barras na região anódica, o que irá causar uma perda de resistência da estrutura e o aparecimento de manchas na cor marrom-alaranjadas (MAR, 2006).

2.3 Corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM)

O método de corrosão acelerada por imersão modificada é um ensaio laboratorial desenvolvido por Lima (1990), no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais da UFRGS (LEME), baseado em ensaios desenvolvidos por Varela e Espinosa (1998). O ensaio de CAIM permite determinar, através de ensaios eletroquímicos, a perda de massa da armadura ao final do teste e a evolução da corrente durante o ensaio (TORRES, *et al.*, 2006).

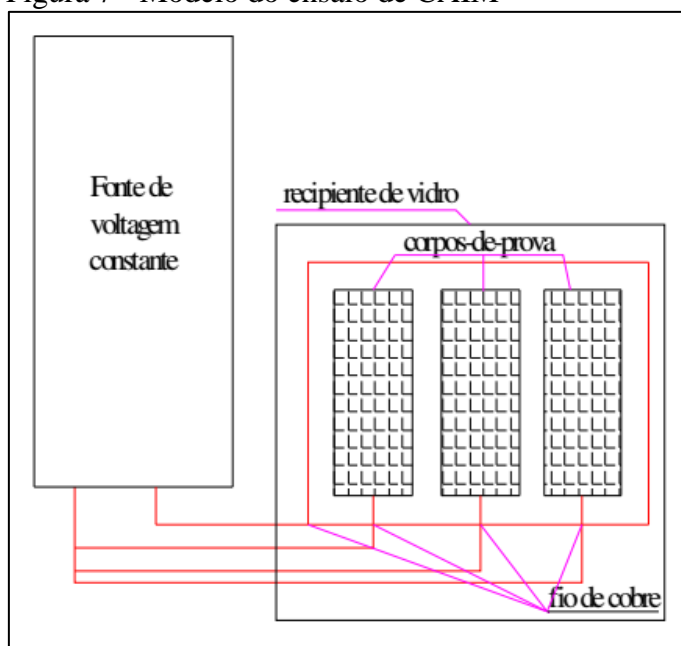
Conforme Graeff (2007), este tipo de ensaio é utilizado com a intenção de observar a degradação das armaduras em um certo período de tempo. O método de CAIM possibilita o acompanhamento da evolução da corrosão e a sua intensidade. Além de avaliar o desempenho

das estruturas, estes ensaios eletroquímicos ajudam a desenvolver novas técnicas para a prevenção e reparo das estruturas de concreto armado.

Os primeiros ensaios de CAIM eram realizados com um aquário de vidro de 8cm x 8cm x 20cm, o qual não tinha fundo, sendo apoiado no corpo de prova e fixado ao molde com auxílio de uma massa vedante, então era colocado neste recipiente uma solução 0,6 M de cloreto de sódio. Para que ocorresse uma indução elétrica na placa de metal contida no corpo de prova, era ligado com uma diferença de potencial de 60V a barra e uma chapa metálica, a uma fonte de alimentação, tornando desta forma a barra de metal um polo positivo e a chapa metálica um polo negativo, possibilitando desta forma a passagem de corrente elétrica entre elas e ocorrendo na direção da barra a movimentação de íons cloretos. A duração do ensaio era de 7 horas, sendo que ao final deste período ocorria o rompimento do corpo de prova, a limpeza da barra e a sua pesagem para verificação da perda de massa (TORRES, 2006).

Torres *et al.* (2006) realizam o ensaio de CAIM com corpos de prova de 10cm x 10cm x 20cm, com uma barra metálica de 12,5 mm de diâmetro e 145mm de comprimento, com um cobrimento de 30mm. A barra metálica é ligada por um fio de cobre ao polo positivo de uma fonte elétrica, outro fio de cobre é ligado ao polo negativo da fonte e mergulhado na solução que envolve os corpos de prova, como pode ser visto na Figura 7. Essa solução contém uma concentração de 35g de cloreto de sódio para cada litro de água. Deverá ser realizada a pesagem das barras utilizadas antes e depois do ensaio.

Figura 7 - Modelo do ensaio de CAIM



Fonte: Torres *et al.* (2006)

2.4 Composição do concreto

O concreto é formado pela água mais aglomerante, que formam a pasta, com a adição de agregado miúdo, para formar a argamassa, mais a adição de agregados graúdos. Em concretos especiais pode-se adicionar aditivos, adições minerais e fibras, elevando desta forma alguma característica do material. Entre as principais características do concreto, a resistência à compressão varia de acordo com o teor de cimento por metro cúbico de concreto, e por sua relação água/cimento. Outra propriedade importante que o concreto deve ter é a plasticidade, característica fundamental para o preenchimento adequado das fôrmas, sem a ocorrência de espaços vazios. Para que o concreto tenha boa trabalhabilidade, medidas como a seleção de agregados, adição de água e uso de aditivos podem ser utilizadas (BOTELHO; MARCHETTI, 2015).

O Concreto Reforçado com Fibras (CRF) é a mistura de cimento *Portland*, água, agregados e fibras discretas e descontínuas. O uso de fibras no concreto gera um aumento na sua resistência à tração, ocasionando uma redução na propagação de fissuras oriundas de esforços de tração (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Conforme Garcez (2005) a adição de fibras ao concreto ainda proporciona um aumento na sua tenacidade e uma maior resistência a impactos.

2.4.1 Tipos de fibras

Fibras são elementos utilizados como reforço no concreto, que podem ser poliméricas ou metálicas. Como característica elas possuem um diâmetro bem menor que o seu comprimento e uma superfície irregular. As fibras utilizadas como reforço no concreto são denominadas macrofibras, já as que não visam nenhum reforço ao concreto são chamadas de microfibras (FIGUEIREDO, 2011).

De acordo com Guimarães (2010) algumas características das fibras irão influenciar diretamente nas propriedades do concreto, como a sua forma, comprimento, diâmetro e massa específica. As características de alguns tipos de fibras podem ser vistas na Tabela 3. Outro fator

que é preciso ter cuidado é no teor de fibras adicionados ao concreto, pois teores muito elevados irão diminuir a sua trabalhabilidade, podendo causar danos à estrutura.

Tabela 3 - Propriedades das fibras

| Material | Diâmetro (µm) | Densidade (g/cm ³) | Módulo de elasticidade (Gpa) | Resistência à tração (Mpa) | Deformação na ruptura (%) |
|---------------|---------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Aço | 5,0-500,0 | 7,8 | 190,0-210,0 | 0,5-2,0 | 0,5-3,5 |
| Vidro | 9,0-15,0 | 2,0 | 70,0-80,0 | 2,0-4,0 | 2,0-3,5 |
| Amianto | 0,02-0,04 | 2,0 | 10,0-200,0 | 3,0-3,5 | 2,0-3,0 |
| Polipropileno | 20,0-200,0 | 0,9 | 5,0-7,7 | 0,5-0,75 | 8,0 |
| Kevlar | 10,0 | 1,5 | 5,0-133,0 | 3,0 | 2,1-4,0 |
| Carbono | 9,0 | 1,9 | 230,0 | 2,0 | 1,0 |
| Nylon | - | 1,1 | 4,0 | 0,9 | 13,0-15,0 |
| Celulose | - | 1,2 | 10,0 | 0,3-0,5 | - |
| Acrílico | 18,0 | 1,2 | 14,0-19,5 | 0,4-1,0 | 3,0 |
| Polietileno | - | 1,0 | 0,3 | 0,0 | 10,0 |
| Madeira | - | 1,5 | 71,0 | 0,9 | - |
| Sisal | 10,0-50,0 | 1,0-50,0 | - | 0,8 | 3,0 |

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Figueiredo (2000, p. 10).

2.4.1.1 Fibras de polipropileno

As fibras de polipropileno possuem origem polimérica e se destacam pelo fato de possuírem uma elevada resistência a ataques químicos, além de terem um baixo custo quando comparadas a outros materiais e possuem uma baixa densidade. Outros fatores que merecem atenção neste tipo de fibra é o seu baixo módulo de elasticidade e a sua inércia (GARCEZ, 2005).

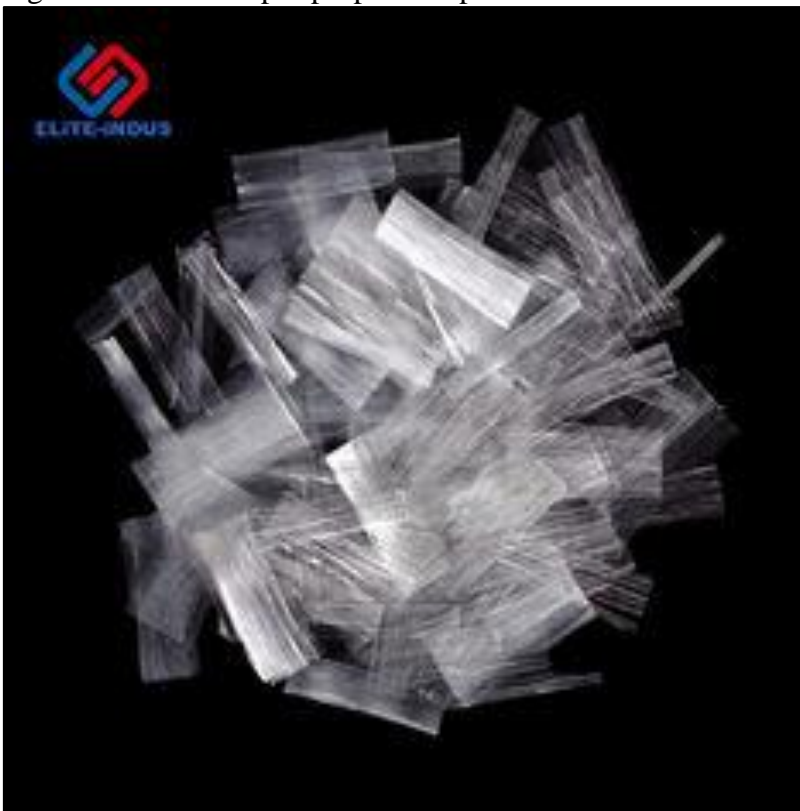
As fibras de polipropileno são divididas em dois tipos, as monofilamentadas e as fibriladas. As fibras de monofilamento tem como característica apresentar fios com o corte em tamanho padrão, como pode ser visto na Figura 8. Já as fibriladas tem como padrão possuir uma malha de finos com seção retangular, conforme Figura 9, que resulta em uma adesão entre a fibra e a matriz, ocasionado por um intertravamento entre elas. (BENTUR; MINDESS, 1990)

Figura 8 - Fibras de polipropileno tipo monofilamento



Fonte: Retirado de NEOMATEX, texto online.

Figura 9 - Fibras de polipropileno tipo fibrilada



Fonte: Retirado de ELITE INDUS, texto online.

Bentur e Mindess (2007) explicam que as fibras monofilamentadas e as fibriladas possuem características como resistência e módulo de elasticidade muito próximas. Quando adicionadas ao concreto, por terem uma estrutura individual, as fibras monofilamentadas possuem uma maior eficiência no combate a fissuras oriundas da retração do concreto.

2.4.1.2 Fibras de aço

As fibras de aço podem possuir diferentes dimensões, formas, tipos de fabricação e de aço. Os tipos mais comuns de fibra de aço são a fibra de aço corrugada, destinada de sobras industriais, seus fios são cortados com comprimento entre 25mm e 50mm, seu formato corrugado possibilita uma maior aderência entre a fibra e o concreto; o segundo tipo de fibra possui seção retangular com uma ancoragem em gancho, produzidas a partir de chapas de aço para uso no concreto; o terceiro tipo de fibra também possui ancoragem em gancho, mas com seção circular, elas são fabricadas a partir de fios trefilados, com diâmetro variando de 0,5mm a 1,0 mm e comprimento de 25mm a 50mm (FIGUEIREDO, 2000).

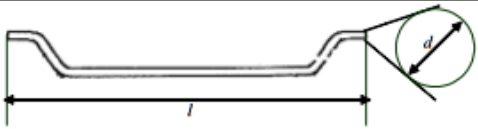
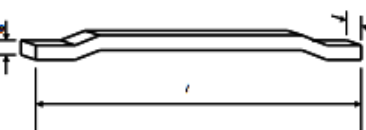
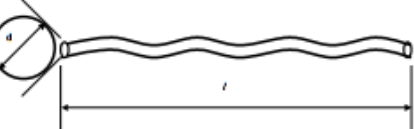
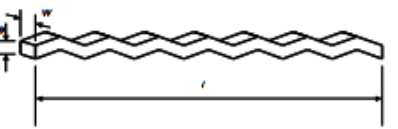
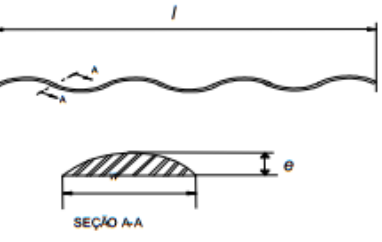
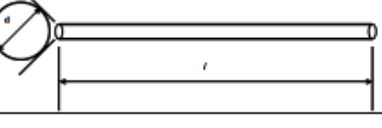
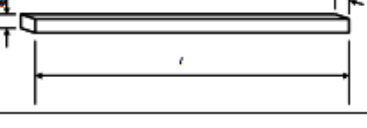
A NBR 15530 (ABNT, 2007) divide os tipos de fibras conforme o seu formato: as do tipo A com ancoragem nas extremidades, as do tipo C, corrugadas e as do tipo R, retas. A norma também divide as fibras em três classes de acordo com a sua fabricação: a classe I é produzida a partir de arame trefilado a frio, a classe II é produzida de chapas laminadas, cortadas a frio e a classe III são produzidas a partir de arames trefilados e escarificados. Na Tabela 4 é possível visualizar os tipos e classificações das fibras de aço, com suas respectivas resistência e fatores de forma, já na Figura 10 pode-se ver a geometria para cada classificação de fibra.

Tabela 4 - Classificação e propriedades das fibras de aço

| Tipo (geometria) | Classe da fibra | Fator de forma mínimo λ | Limite de resistência à tração do aço Mpa |
|------------------|-----------------|---------------------------------|---|
| A | I | 40 | 1000 |
| | II | 30 | 500 |
| C | I | 40 | 800 |
| | II | 30 | 500 |
| | III | 30 | 800 |
| R | I | 40 | 1000 |
| | II | 30 | 500 |

Fonte: Adaptado pelo autor com base na NBR 15530 (ABNT, 2007, p. 3).

Figura 10 - Geometria das fibras

| Tipo | Classe da fibra | Geometria |
|------|-----------------|--|
| A | I |  |
| | II |  |
| C | I |  |
| | II |  |
| | III |  |
| R | I |  |
| | II |  |

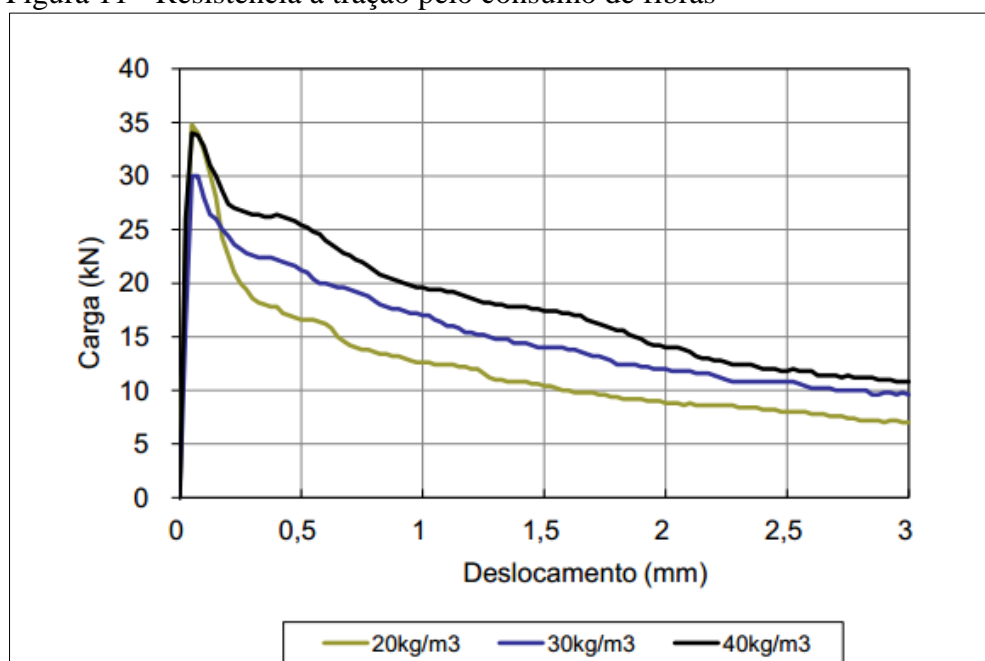
Fonte: Figueiredo (2000)

Conforme Figueiredo (2000), quando adicionadas ao concreto, as fibras de aço proporcionam uma redistribuição de esforços e dificultam a propagação de fissuras. O concreto com fibras de aço passa a ter características pseudo-dúctil, ele deixa de ter uma ruptura abrupta, característica de materiais frágeis e passa a ter uma velocidade de propagação de fissuras muito reduzida.

2.4.2 Características do concreto com fibras

Conforme Figueiredo (2011) a resistência à fissuração do concreto com fibras varia de acordo com o teor de fibras utilizadas: quanto maior for o seu teor, maior será a sua resistência, pois haverá um maior número de fibras transferindo esforços. Na Figura 11 o autor demonstra os resultados de um ensaio de tração na flexão com deslocamento controlado, com consumos de fibra de aço de 20kg/m³, 30kg/m³ e 40kg/m³, onde é possível ver que antes da abertura de fissuras o teor de fibras quase não interfere na resistência, já após a fissuração os teores mais elevados apresentam um melhor desempenho. Já para fibras de polipropileno, estima-se um teor aproximado entre 600g e 1000g por metro cúbico de concreto.

Figura 11 - Resistência à tração pelo consumo de fibras



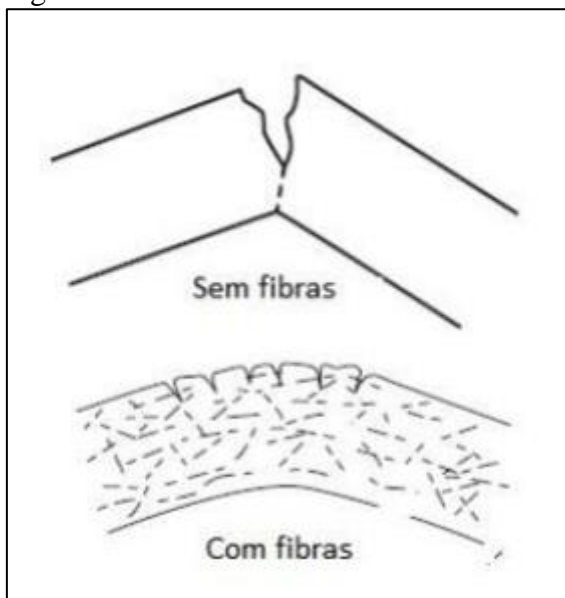
Fonte: Figueiredo (2011)

Devido as fibras de aço não possuírem nenhum tratamento contra corrosão, sua durabilidade fica condicionada a vida útil do concreto. Pode-se observar que em revestimentos de túneis e superfícies de pavimentos com o uso de fibra metálica ocorre a oxidação das mesmas. Por outro lado, a redução da fissuração causa a diminuição da entrada de agentes agressivos, o que pode levar a redução da corrosão das armaduras (FIGUEIREDO, 2000).

Granju e Balouch (2005) apud Medeiros (2012), através de ensaios com corpos de prova com concreto com fibra metálica expostos à névoa salina, analisaram que a corrosão das fibras não ocorre em fissuras menores que 0,1mm e com fissuras de 0,5mm ocorre uma leve corrosão. Através deste estudo os autores constataram também um aumento na resistência a flexão dos corpos de prova, que é causado devido à leve corrosão das fibras, que possibilita uma maior aderência entre concreto e fibra, dificultando o seu arrancamento.

Conforme Mehta e Monteiro (2014), o concreto com fibras apresenta uma maior tenacidade que o concreto convencional, ou seja, o concreto possui uma maior resistência à abertura de fissuras. Corpos de prova de concreto com fibras de polipropileno não se rompem imediatamente após a abertura de sua primeira fissura, começam a aparecer diversas fissuras menores, que vão progredindo até o rompimento do corpo de prova. Na Figura 12 é possível visualizar o comportamento do concreto com fibras de polipropileno.

Figura 12 - Tenacidade do concreto com fibras



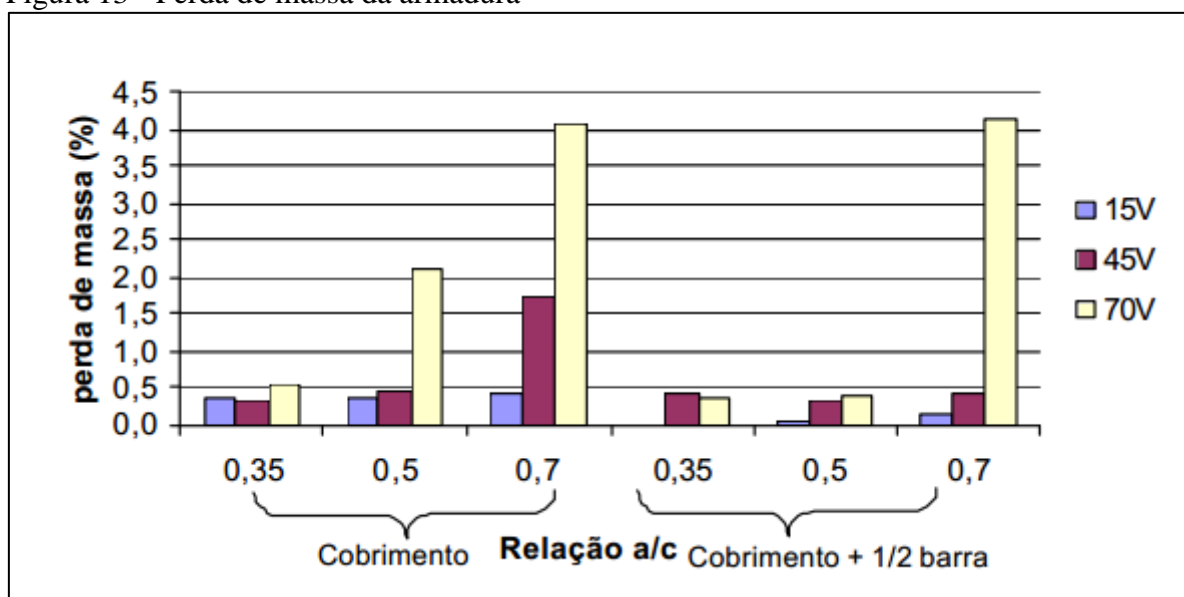
Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Medeiros (2012) explica que existem algumas informações conflitantes no comportamento de concreto com fibras. O autor cita que diversas pesquisas concluem que a adição de fibras melhora o comportamento à fadiga do concreto, mas alguns fatores como frequência e sequência dos carregamentos, dosagem do concreto e configuração dos ensaios podem alterar os resultados. Estes estudos apontam que a adição de fibras ao concreto não garante um melhor desempenho à fadiga em compressão, mas ocorre uma melhora no desempenho à fadiga em flexão.

2.5 Estudos realizados

A corrosão da armadura em concretos reforçados com fibras é uma área com estudos pouco aprofundados no Brasil. Torres *et al.*, (2006) estudam a corrosão das armaduras em concretos convencionais, pelo método de CAIM, utilizando diferentes relação água/cimento e aplicando diferentes voltagens no ensaio, utilizando dois níveis de soluções. No Figura 13 é apresentada a porcentagem de perda massa obtida, para cada relação água/cimento e voltagem testada. O Ensaio foi realizado por um período de 8 horas.

Figura 13 - Perda de massa da armadura



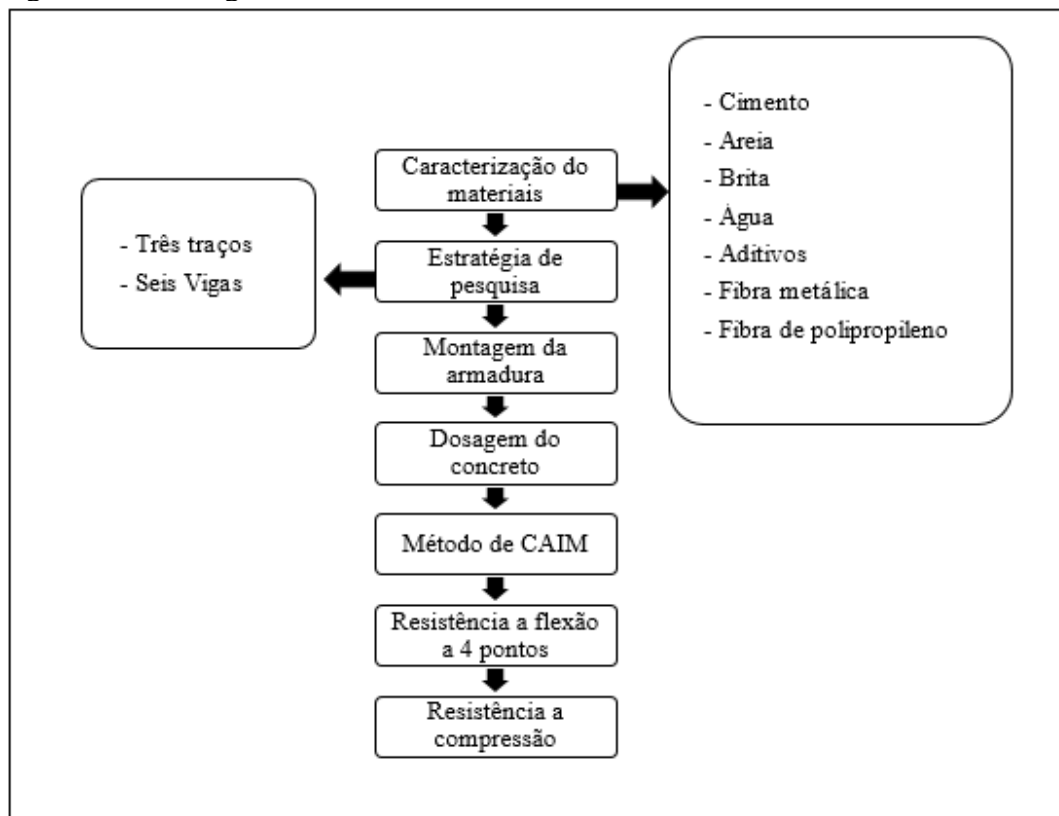
Fonte: Torres *et al.*, (2006)

Neste estudo Torres *et al.* (2006) demonstram poucas alterações quando comparados os níveis de soluções, mas uma grande elevação na perda de massa na reação água cimento de 0,7. É possível observar nesta pesquisa que a perda de massa cresce conforme o aumento da voltagem e a elevação da relação água/cimento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de identificar todos os ensaios, equipamentos e materiais necessários para que os objetivos desta pesquisa sejam atingidos. Todos os ensaios de caracterização de materiais realizados seguiram os padrões impostos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas. O fluxograma dos procedimentos realizados pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma dos ensaios



Fonte: Autor (2019)

3.1 Materiais

Para que o concreto atinja as características requeridas, é essencial que se tenha um rígido controle de qualidade no momento da escolha dos materiais, para que desta forma se obtenha o traço ideal. Visto isso, foram realizados ensaios laboratoriais para a caracterização dos materiais.

3.1.1 Cimento

Para todos os traços estabelecidos nesta pesquisa, foi utilizado o mesmo tipo de cimento, mesmo lote e mesma marca, para que isto não influencie nos resultados. Conforme a necessidade desta pesquisa, optou-se pela utilização do um cimento do tipo CP V, ARI de Alta Resistência Inicial da marca Itambé. Suas características fornecidas pelo fabricante podem ser vistas no Quadro 3.

Quadro 3 - Características do cimento CP V

| Parâmetros CP V-ARI | |
|---------------------------------|-------------|
| Tempo de início de pega (horas) | ≥ 1 |
| MgO (%) | $\leq 6,5$ |
| Perda ao fogo (%) | $\leq 6,5$ |
| Resíduo insolúvel (%) | $\leq 3,5$ |
| SO ₃ (%) | 4,5 |
| Resistência à compressão (MPa) | |
| 1 dia | $\geq 14,0$ |
| 3 dias | $\geq 24,0$ |
| 7 dias | $\geq 34,0$ |
| 28 dias | - |
| Adições permitidas (%) | |
| Escória | 0 |
| Fíler calcário | 0 a 10 |
| Material pozzolânico | 0 |

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Itambé Cimentos (2019).

A determinação da massa específica do cimento (ρ) foi realizada conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017). Este ensaio é realizado com a utilização de um frasco de *Le Cha telier*, no qual é colocado, com o auxílio de um funil, um líquido de medição, xilol, devendo ficar em uma faixa graduada de 0 a 1 cm³. O frasco deve passar por um termo regulação durante 20 minutos e após, deve-se realizar as leituras do Volume inicial (V_i) e da Temperatura inicial (T_i). Em seguida coloca-se a massa inicial (M) de 60 g de cimento no frasco de *Le Cha telier*, com o material totalmente misturado com o xilol, leva-se o material novamente para um banho termo regulador, após 20 minutos realizam-se as leituras do Volume final (V_f) e da Temperatura final (T_f). O cálculo da massa inicial é apresentado na Equação 01.

(Equação 01)

$$\rho = \frac{M}{V_f - V_i}$$

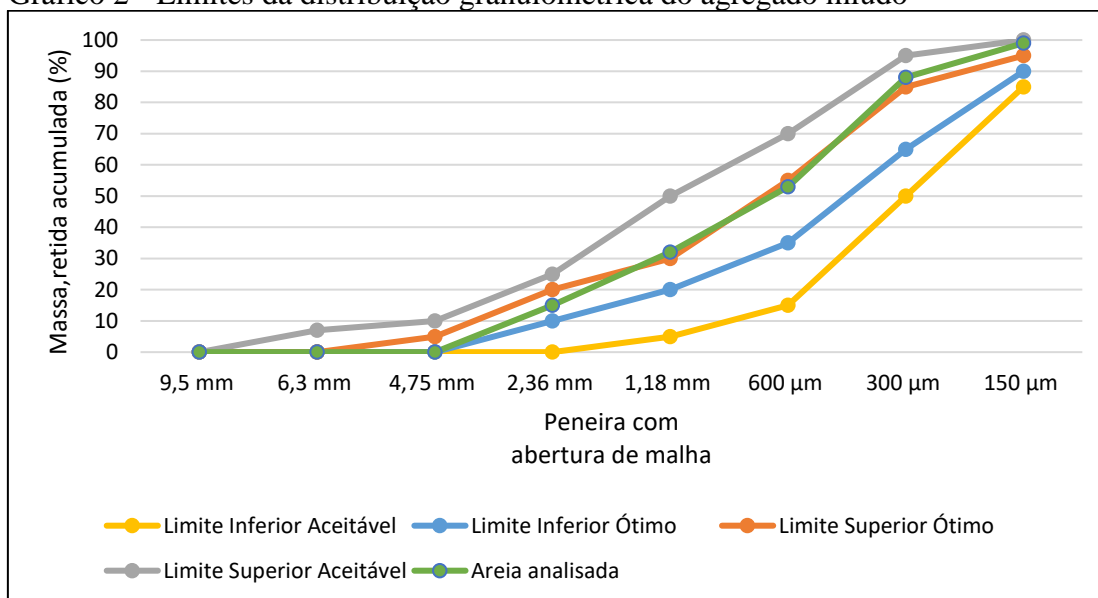
Através do ensaio obteve-se uma massa específica para o cimento de 2,71 g/cm³.

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na realização desta pesquisa foi fornecido pelo LATEC. Este agregado é uma areia quartzosa média, de origem natural da região do Vale do Taquari. Antes de sua utilização a areia passou por ensaios de caracterização que definiram sua granulometria e massa específica.

A realização da granulometria seguiu os passos da NBR NM 248 (ABNT, 2003), que consiste no peneiramento mecânico do agregado miúdo. De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), o agregado miúdo, após passar pelo ensaio de peneiramento, deverá ficar dentro do intervalo da zona ótima ou da zona utilizável, sendo preferencialmente dentro da zona ótima. No Gráfico 2 podem ser vistos os limites dos intervalos e a curva granulométrica da areia utilizada.

Gráfico 2 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor (2019).

Para o ensaio de massa específica seguindo os preceitos da NBR NM 53 (ABNT, 2009) do agregado miúdo, foi necessário 1kg do material. A amostra do agregado foi colocada em um recipiente com água suficiente para cobrir todo material, ficando em repouso por 24 horas. Após esse período, removeu-se a areia, deixando-a secar em temperatura ambiente até que seus grãos não ficassem fortemente aderidos entre si. O material foi colocado em um molde de tronco-cônico metálico, com diâmetro superior de 40 mm, diâmetro inferior de 90 mm e altura de 75 mm, com espessura mínima de 1 mm. Após, passou-se por um processo de compactação de 25 golpes com uma haste metálica. A amostra foi considerada pronta para seguir para a próxima etapa do ensaio no momento em que o molde foi retirado e ocorreu o desmoronamento do agregado, assim foi considerada saturada com superfície seca.

Com a amostra da areia preparada, colocou-se em um frasco de 500 cm³, 500g do agregado miúdo. O frasco foi preenchido com água até a marca de 500 mL e permaneceu em repouso por 1 hora. Após esse período completou-se com água o volume faltante para preencher os 500 mL. Por fim a areia foi removida do frasco por completa e seguiu para uma estufa, onde permaneceu até ter uma massa constante.

A massa específica do agregado miúdo (d_3) foi calculada em gramas por centímetros cúbicos através da Equação 02 apresentada abaixo. Para o cálculo foram utilizados os seguintes parâmetros: a massa da amostra seca em estufa (m), em gramas; o volume do frasco (V), em

centímetros cúbicos; o volume de água adicionado ao frasco (V_a), em centímetros cúbicos; a massa da amostra na condição saturada superfície seca (m_s), em gramas; e a massa específica da água (ρ_a), em gramas por centímetro cúbico.

(Equação 02)

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}}$$

Os resultados obtidos com os ensaios de caracterização são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Caracterização da areia

| Material | Módulo de finura | Massa específica (g/cm ³) |
|----------|------------------|---------------------------------------|
| Areia | 2,87 | 2,77 |

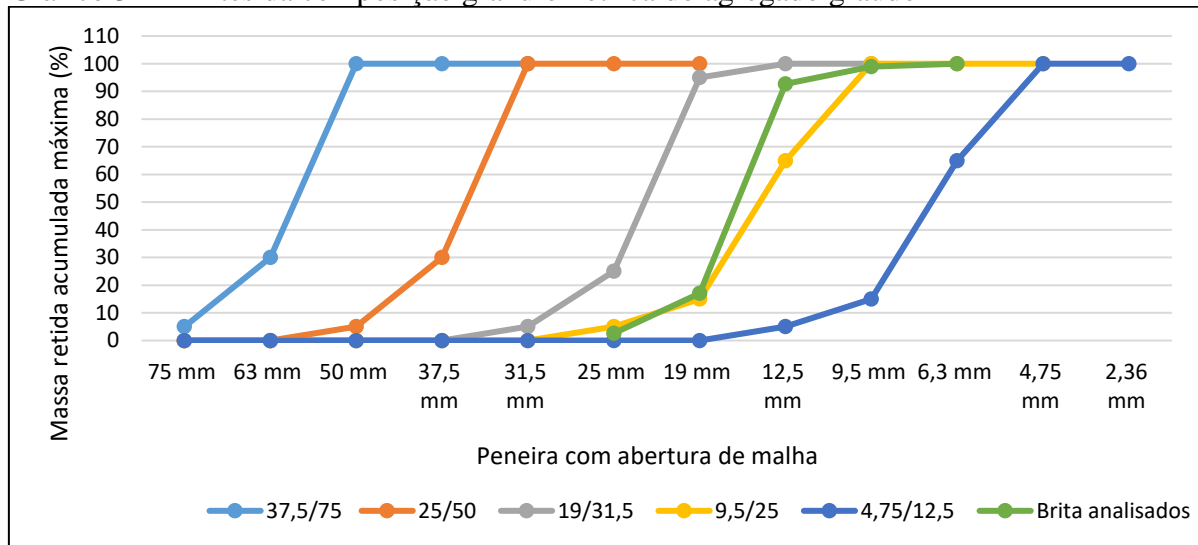
Fonte: Autor (2019)

3.1.3 Agregado graúdo

Como agregado graúdo foi utilizada uma brita de origem basáltica do tipo 1. O agregado graúdo também passou por ensaios de caracterização física para obtenção de sua granulometria e massa específica.

Para a análise granulométrica do agregado graúdo foi realizado um ensaio de peneiramento, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Após o peneiramento foi realizada a sua classificação de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), conforme Gráfico 3.

Gráfico 3 - Limites da composição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autor (2019).

Com base na NBR NM 53 (ABNT, 2009), foi realizado o ensaio de massa específica do agregado graúdo. O ensaio foi realizado através da imersão de uma massa conhecida do agregado em água a temperatura ambiente. Após um período de 24 horas este agregado foi retirado da água e pesado novamente, obtendo-se o valor do agregado saturado com superfície seca (m_s), em seguida a amostra foi submergida em água e novamente pesada, obtendo o seu valor de massa em água (m_a), por fim o agregado foi secado em estufa até se obter uma massa constante (m). A massa específica de agregado seco (d) foi obtida através da Equação 03.

(Equação 03)

$$d = \frac{m}{m_s - m_a}$$

Através do ensaio obteve-se uma massa específica para o cimento de 2,77 g/cm³.

3.1.4 Água de amassamento

De acordo com a NBR 15900-1 (ABNT, 2009), é permitido o uso de águas utilizadas no abastecimento público para a fabricação de concretos, sem a necessidade de realização de

ensaios da mesma. A água utilizada neste ensaio foi a mesma utilizada no abastecimento do prédio 17, da Univates.

3.1.5 Aditivo

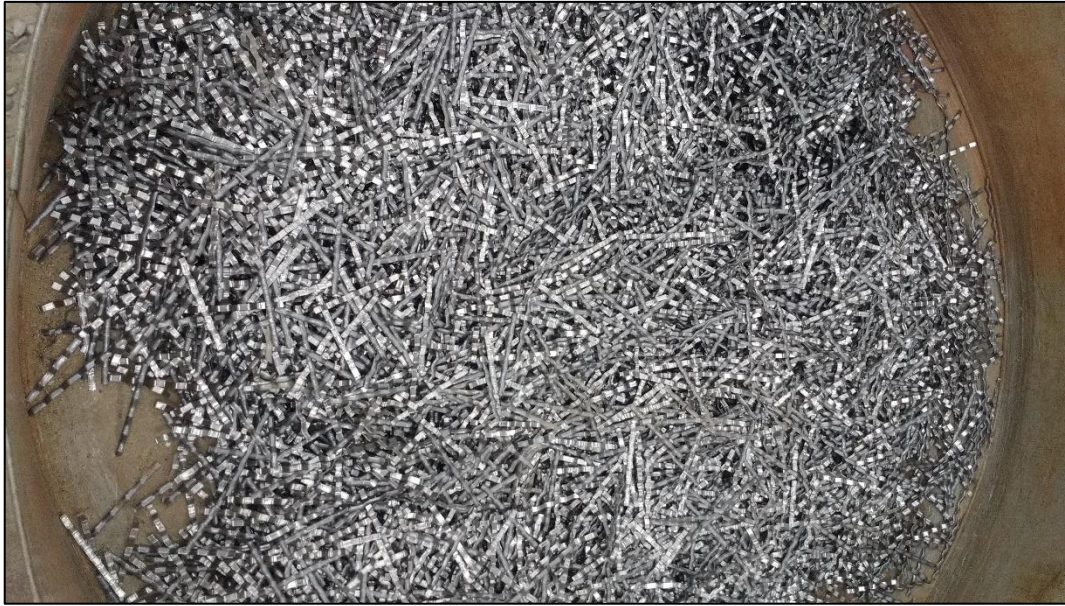
O aditivo utilizado neste trabalho foi um superplastificante da marca Rodoquímica à base de melanina e naftaleno, tendo maior eficácia quando adicionado ao concreto minutos após a água de amassamento. Este tipo de aditivo tem como característica dar ao concreto elevada trabalhabilidade com baixas relações de água/cimento. Conforme especificações do fabricante, foram utilizados os teores de 0,4% de aditivo para o concreto convencional e 0,6% para os concretos com fibras.

3.1.6 Fibra metálica

Com base na NBR 15530 (ABNT, 2007) as fibras metálicas utilizadas em concretos devem seguir determinados parâmetros para que possam garantir um adequado desempenho ao concreto. Deve-se atentar para características como a forma geométrica, resistência à tração, dobramento e eventuais defeitos de fabricação. As fibras metálicas são classificadas de acordo com o tipo de aço utilizado em sua fabricação e o formato de sua seção transversal.

As fibras metálicas utilizadas foram da marca MM Fibras de aço carbono ASTM A 820, modelo arame de aço corrugado, com comprimento médio de 40 mm, largura de 2 mm, espessura de 0,7 mm e altura 40 mm. Conforme indicações do fabricante essas fibras possuem uma resistência aproximada de 800 Mpa por fio e uma concentração de 4620 fios por quilograma. As fibras podem ser visualizadas na Figura 15.

Figura 15 - Fibra metálica utilizada



Fonte: Autor (2019).

3.1.7 Fibra de polipropileno

As fibras de polipropileno utilizadas foram do tipo SikaFiber®-12 Micro PP, que é uma fibra de monofilamento feita com 100% polipropileno. Estas fibras possuem uma densidade de 0,91 kg/L, comprimento de 12mm. Na figura 16 pode-se visualizar a fibra utilizada na concretagem.

Figura 16 - Fibra de polipropileno utilizada



Fonte: Autor (2019).

3.2 Estratégia de pesquisa

Para a realização desta pesquisa foram moldadas 6 vigas de concreto armado, com três traços diferentes, sendo que com cada traço elaborado serão confeccionadas duas vigas, uma ficando em um tanque de corrosão acelerada e a outra permanecendo em um ambiente sem maiores agressividades, para ser um ponto de referência para análises. Entre os traços desenvolvidos, um será realizado para referência (sem fibras), em outro será utilizado fibra metálica e em outro a fibra de polipropileno. Juntamente com a concretagem das vigas, será realizada a moldagem de corpos de prova para verificação da resistência à compressão do concreto aos 7, 14 e 28 dias. Na Figura 17 podem ser vistos as vigas e os corpos de prova moldados.

Figura 17 - Corpos de prova e vigas moldados



Fonte: Autor (2019).

O ensaio de CAIM foi realizado 28 dias após a concretagem das vigas, permanecendo nos devidos procedimentos do ensaio por 30 dias, sendo avaliada a dissipação da corrosão na

armadura durante este período. Após os 30 dias, todas as vigas foram rompidas em ensaio de flexão à 4 pontos.

3.3 Montagem da armadura

Para a montagem das armaduras das vigas foi utilizado aço da Classe CA-50, com fabricação pelo processo de laminação a quente. Este tipo de aço tem por característica a resistência ao escoamento de 500 MPa e módulo de elasticidade admitido em 210.000 MPa. Na Tabela 5 são apresentadas as características do aço conforme a sua bitola. As armaduras respeitaram as dimensões das vigas de 100 cm x 15 cm x 15 cm, com um cobrimento de 2 cm.

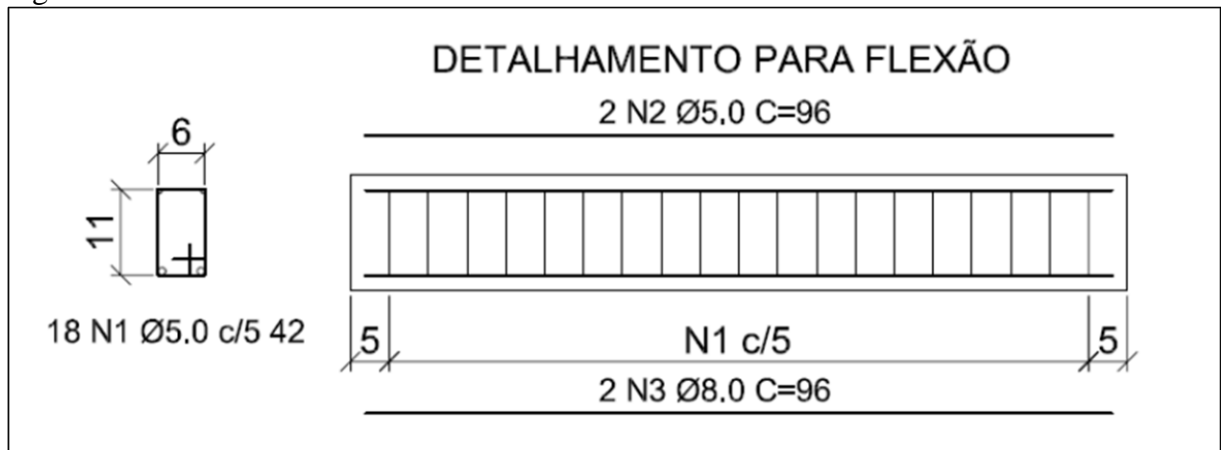
Tabela 5 - Características do aço

| Diâmetro Nominal (DN) (mm) | Massa Nominal (Kg/m) | Resistência Característica de Escoamento (fy) (MPa) | Diâmetro do Pino para Dobramento a 180° (mm) |
|-------------------------------|-------------------------|--|--|
| 6,3 | 0,245 | 500 | 3 x DN |
| 8,0 | 0,395 | 500 | 3 x DN |
| 10,0 | 0,617 | 500 | 3 x DN |
| 12,5 | 0,963 | 500 | 3 x DN |
| 16,0 | 1,578 | 500 | 6 x DN |
| 20,0 | 2,466 | 500 | 6 x DN |
| 25,0 | 3,853 | 500 | 6 x DN |
| 32,0 | 6,313 | 500 | 6 x DN |
| 40,0 | 9,865 | 500 | 6 x DN |

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Guerdau (2019).

Com base na NBR 6118 (ABNT, 2014), Batisti (2017) dimensionou para o ensaio de flexão, adaptado pelo Laboratório de Tecnologia da Construção da Univates, uma armadura com duas barras positivas com bitola de 8 mm e duas barras negativas com bitola de 5 mm. Também foram dimensionados 18 estribos, com diâmetro de 5 mm com espaçamento de 5 cm cada um. O detalhamento da armadura para flexão é apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Detalhamento da armadura



Fonte: Batisti (2017)

Com o auxílio de dois cavaletes, primeiramente foram fixados os estribos nas barras positivas, para após serem fixados os estribos nas barras negativas. Para a amarração entre estribos e barras foi utilizado um arrame recozido de 1,25 mm. Nas Figuras 19 e 20 é possível visualizar o processo de montagem da armadura e as armaduras finalizadas.

Figura 19 - Processo de montagem das armaduras



Fonte: 1Autor (2019).

Figura 20 - Armaduras finalizadas

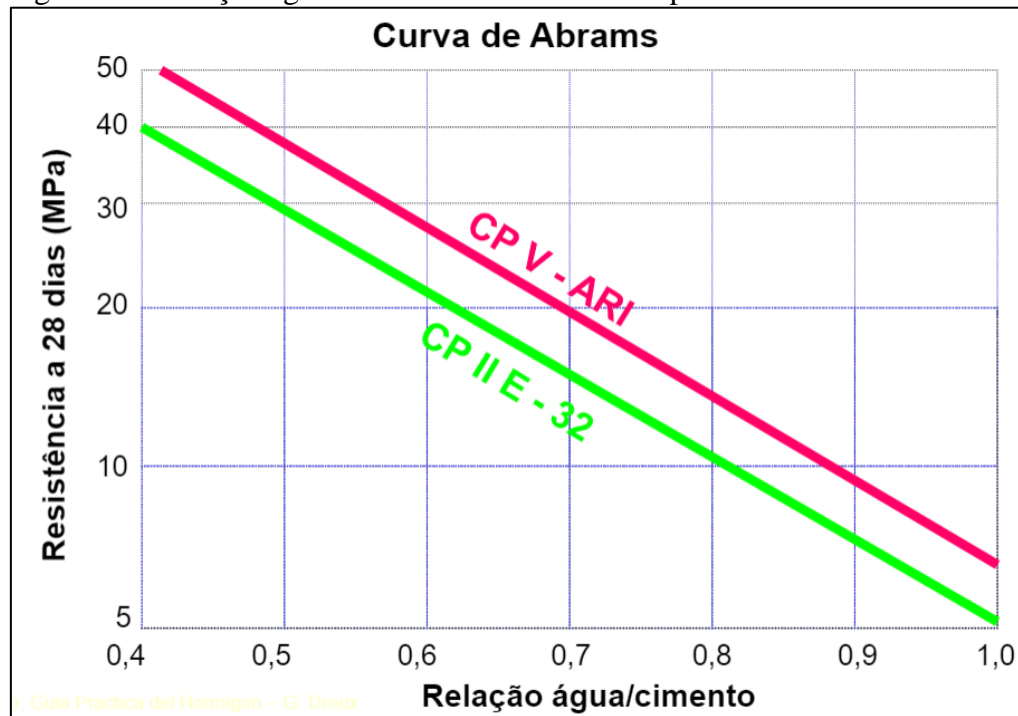


Fonte: Autor (2019).

3.4 Dosagem do concreto

Através do método da Associação Brasileira de Cimento *Portland* (ABCP) foi realizada a dosagem do concreto. Este método baseia-se na dosagem do *American Concrete Institute* (ACI) e é utilizado para concretos de consistência plástica a fluída. Com o uso da tabela representada na Figura 21 é possível determinar a relação água/cimento da mistura para uma resistência desejada a 28 dias após a concretagem.

Figura 21 - Relação água cimento/resistência à compressão



Com a relação água cimento definida, foi definido o consumo de água (ca) da mistura, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Consumo de água em l/m³

| Abatimento (mm) | D _{máx} agregado graúdo (mm) | | | | |
|--------------------|---------------------------------------|------|------|------|------|
| | 9,5 | 19,0 | 25,0 | 32,0 | 38,0 |
| 40 a 60 | 220 | 195 | 190 | 185 | 180 |
| 60 a 80 | 225 | 200 | 195 | 190 | 185 |
| 80 a 100 | 230 | 205 | 200 | 195 | 190 |

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Ambrozewicz (2012).

Com o consumo de água definido, foi calculado através da Equação 04 o consumo de cimento do concreto em kg/m³.

(Equação 04)

$$cc = \frac{ca}{a/c}$$

Para a definição do consumo do agregado graúdo, foi determinado primeiramente o volume do agregado seco (V_b), com base na Tabela 7. A tabela define o volume do agregado seco com base no módulo de finura e na dimensão máxima do agregado graúdo.

Tabela 7 - Volume do agregado graúdo seco

| MF | Dimensão Máxima (mm) | | | | |
|-----|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 9,5 | 19,0 | 25,0 | 32,0 | 38,0 |
| 1,8 | 0,645 | 0,770 | 0,795 | 0,820 | 0,845 |
| 2,0 | 0,625 | 0,759 | 0,775 | 0,800 | 0,825 |
| 2,2 | 0,605 | 0,730 | 0,755 | 0,780 | 0,805 |
| 2,4 | 0,585 | 0,710 | 0,735 | 0,760 | 0,785 |
| 2,6 | 0,565 | 0,690 | 0,715 | 0,740 | 0,765 |
| 2,8 | 0,545 | 0,670 | 0,695 | 0,720 | 0,745 |
| 3,0 | 0,525 | 0,650 | 0,675 | 0,700 | 0,725 |
| 3,2 | 0,505 | 0,630 | 0,655 | 0,680 | 0,705 |
| 3,4 | 0,485 | 0,610 | 0,635 | 0,660 | 0,685 |
| 3,6 | 0,465 | 0,590 | 0,615 | 0,640 | 0,665 |

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Ambrozewicz (2012).

O consumo de agregado graúdo (C_b) foi obtido através da Equação 05, utilizando o volume do agregado seco (V_b) e a massa unitária compactada do agregado graúdo (M_c).

(Equação 05)

$$C_b = V_b \times M_c$$

O consumo de agregado miúdo (C_m), foi definido com através Equação 06, utilizando o consumo de cimento (C_c), o consumo de brita (C_b), o consumo de água (C_a) e a massa específica dos materiais (γ).

(Equação 06)

$$C_m = 1 - \left(\frac{C_c}{\gamma_c} + \frac{C_b}{\gamma_b} + \frac{C_a}{\gamma_a} \right) \times \gamma_{\text{areia}}$$

O traço unitário da mistura foi obtido pela seguinte razão:

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : \frac{C_b}{C_c}$$

Desta maneira foram obtidos os traços unitários (TABELA 8) e as quantidades totais necessárias (TABELA 9).

Tabela 8 - Traços unitários

| Tipo | Cimento | Brita | Areia | Água | Fibras |
|-------------------------------------|---------|-------|-------|------|---------|
| Concreto com fibra de polipropileno | 1 | 2,21 | 1,48 | 0,40 | 0,00211 |
| Concreto com fibra metálica | 1 | 2,21 | 1,48 | 0,40 | 0,08421 |
| Concreto convencional | 1 | 2,21 | 1,49 | 0,40 | - |

Fonte: Autor (2019).

Tabela 9 - Consumo de materiais

| Tipo | Cimento (kg) | Brita (kg) | Areia (kg) | Água (L) | Fibra (g) |
|-------------------------------------|-----------------|---------------|---------------|-------------|-----------|
| Concreto com fibra de polipropileno | 28,08 | 62,08 | 41,80 | 11,23 | 59,13 |
| Concreto com fibra metálica | 28,08 | 62,08 | 41,80 | 11,23 | 2365,20 |
| Concreto convencional | 28,08 | 62,08 | 41,97 | 11,23 | - |

Fonte: Autor (2019).

O consumo de fibras metálicas será utilizado conforme teor definido por Figueiredo (2011), de 40 kg/m³. O autor também define um consumo para fibras de polipropileno entre 600g e 1000g por metro cúbico de concreto, assim optou por um teor de 1000g por metro cúbico.

A mistura dos materiais ocorreu adicionando primeiramente o agregado graúdo, seguido do agregado miúdo, deixando misturar por 10 segundos, em seguida adicionou-se o cimento, misturando por mais 25 segundos, após foi adicionado a água, deixando os materiais misturarem por 25 segundos. As Fibras foram adicionadas em seguida, misturando por cerca

de 75 segundos e, por fim, adicionou-se o aditivo. Após a adição do superplastificante o concreto seguiu em mistura na betoneira por mais três minutos.

Para cada concretagem foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*), conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998). Os corpos de prova foram moldados respeitando o prescrito pela NBR 5738 (ABNT, 2016). As vigas foram moldadas em etapa única e adensadas com o auxílio de um vibrador por imersão, conforme Figura 22.

Figura 22 - Adensamento do concreto



Fonte: Autor (2019).

3.5 Caracterização dos materiais

Visando alcançar os objetivos específicos desta pesquisa, foram realizados os ensaios de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada, ensaio de flexão a 4 pontos, ensaio de resistência à compressão e o mapeamento das fissuras.

3.5.1 Ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM)

A corrosão acelerada das vigas foi realizada pelo método de CAIM. Para a realização do ensaio foi necessária a utilização de uma caixa de madeira devidamente selada, para que não ocorram vazamentos, conforme Figura 23. Nesta caixa as vigas foram submetidas a uma solução de cloretos de 35 g/L, concentração semelhante à do Oceano Atlântico, atingindo a altura do cobrimento e permanecendo assim por um período de aproximadamente 30 dias.

Figura 23 - Vigas colocadas para início do ensaio



Fonte: Autor (2019)

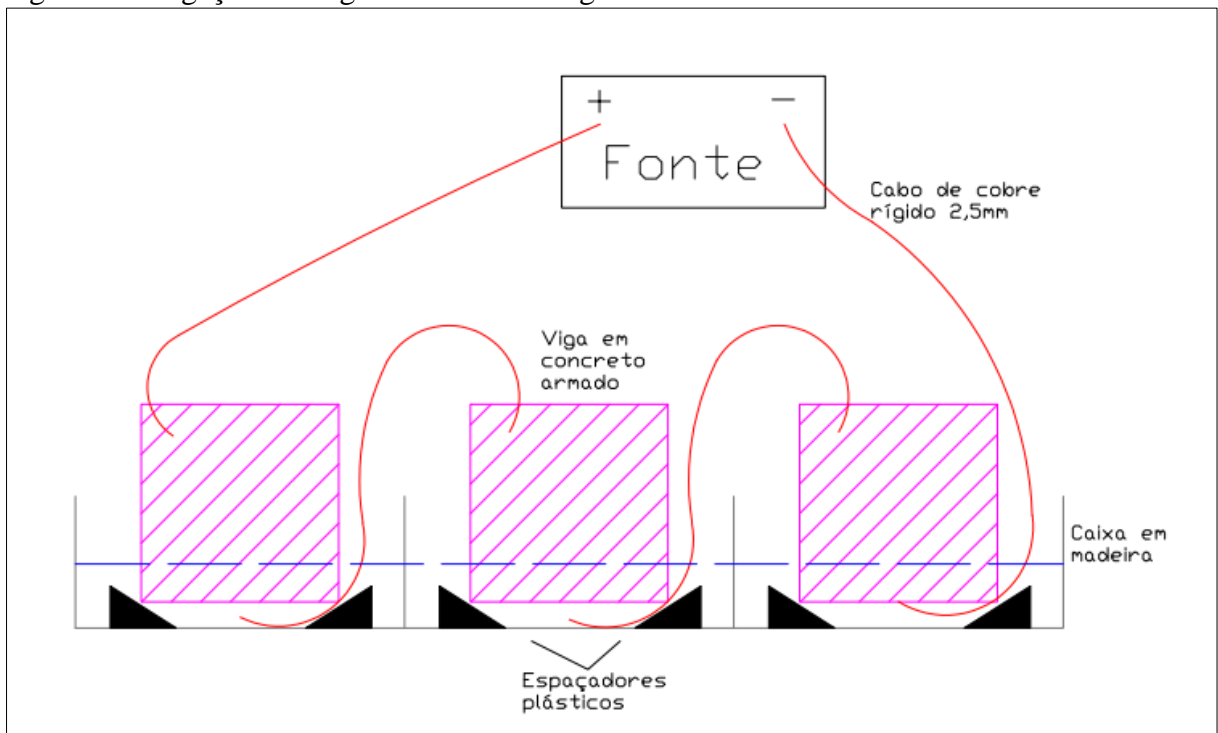
Com a utilização de fios de cobre rígido de 2,5 mm e uma fonte de alimentação, com corrente constante pré-estabelecida de 240 mA (FIGURA 24), as vigas foram ligadas em série ao polo positivo da fonte, conforme demonstrado na Figura 25. Os fios foram ligados sobre as barras de aço durante o processo de montagem das armaduras, como pode ser visto na Figura 26. O polo negativo da fonte foi conectado a solução de cloretos com um novo fio de cobre.

Figura 24 - Fonte de tensão utilizada no ensaio



Fonte: Autor (2019)

Figura 25 - Ligação das vigas à fonte de energia



Fonte: Autor (2019).

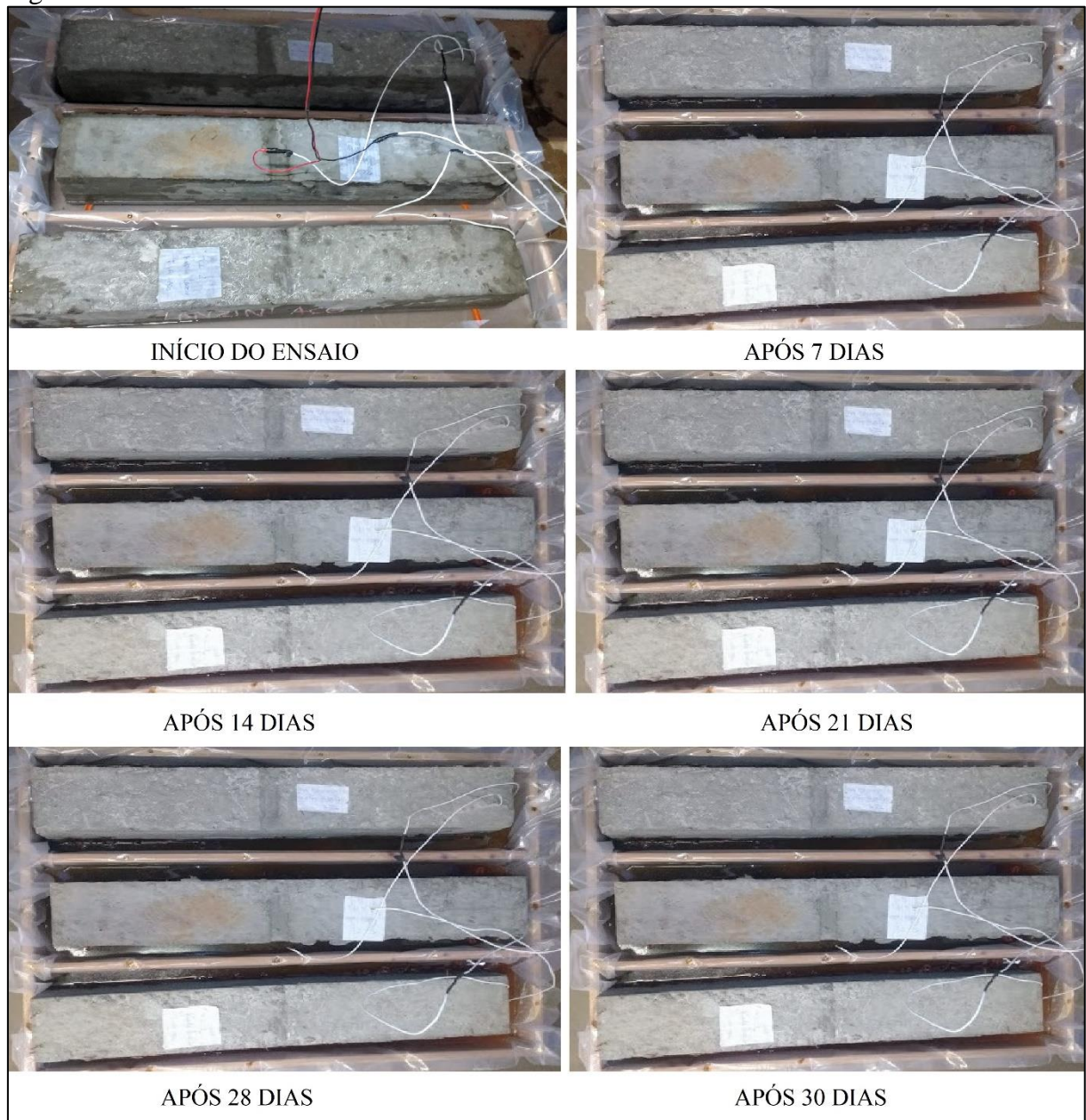
Figura 26 - Posicionamento do fio de cobre na armadura



Fonte: Autor (2019)

Após o início do ensaio, realizou-se um monitoramento semanal da corrosão das vigas, sendo possível desta forma realizar uma pré-avaliação da corrosão. Na figura 27 é possível verificar o andamento do ensaio a cada semana, com a água se tornando mais turva com o passar dos dias.

Figura 27 - Andamento do ensaio de CAIM



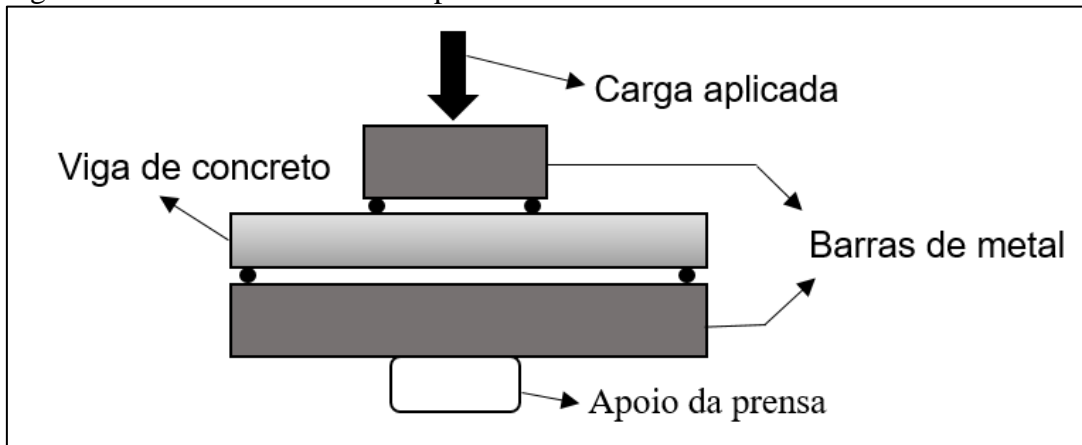
Fonte: Autor (2019).

3.5.2 Resistência à flexão a 4 pontos

Para a realização deste ensaio foram utilizados suportes metálicos elaborados pelo laboratório de Tecnologia da Construção adaptados a prensa de compressão. Na parte superior o suporte foi posicionado na parte central da viga, cobrindo um terço do seu comprimento total.

Já na parte inferior, o suporte foi apoiado na base do equipamento e tendo o comprimento total da viga. Na Figura 28 pode ser visto um modelo do ensaio e na Figura 29 é apresentado o ensaio sendo realizado.

Figura 28 - Modelo de flexão à 4 pontos



Fonte: Autor, 2019.

Figura 29 - Ensaio de flexão a quatro pontos



Fonte: Autor (2019).

O cálculo da resistência à tração na flexão das vigas é obtido seguindo a NBR 12142 (ABNT, 2010). O cálculo utiliza a força final do ensaio (F), a dimensão entre os apoios (l), fixada no ensaio em 960 mm, a largura (b) e altura do corpo de prova (d), ambas com 150 mm no ensaio. Na Equação 7 é apresentada a fórmula para o cálculo da resistência à tração, quando a ruptura ocorre no terço médio das vigas.

(Equação 7)

$$f_{ct,f} = \frac{F \times l}{b \times d^2}$$

3.5.3 Mapeamento de fissuras

Para analisar a abertura das fissuras das vigas após o rompimento das estruturas à flexão, foi realizado um mapeamento com a utilização de uma régua, para verificação das distancias das fissuras e um fissuometro, para análise da espessura das fissuras. As medidas coletadas foram representadas graficamente com o auxílio do *software* AutoCad.

3.5.4 Perda de massa da armadura

Para verificar a perda de seção da armadura, com o auxílio de um rompedor de concreto, foi removido aproximadamente 3 cm de concreto da parte inferior das vigas submetidas ao ensaio de CAIM, deixando a armadura positiva amostra. Com a utilização de um paquímetro foram realizadas 10 leituras em cada barra corroída, conforme demonstra a Figura 30. A perda de massa foi obtida através da média destes 10 pontos, levando em consideração o diâmetro original da barra de 8 mm.

Figura 30 - Análise da perda de seção da armadura



Fonte: Autor (2019).

3.5.5 Resistência à compressão

O teste de resistência à compressão foi realizado conforme previsto na NBR 5738 (ABNT, 2015). Para a realização do ensaio de compressão, foram moldados corpos de provas no formato cilíndrico com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 centímetros de altura. A moldagem dos corpos de prova dividiu-se em 3 camadas, sendo que a cada camada foram aplicados 12 golpes com uma haste metálica para a compactação do concreto. Vinte e quatro horas após a concretagem os corpos de prova foram desmoldados e armazenados em uma câmara úmida, de onde só saíram para serem rompidos aos 7, 14 e 28 dias, com uma amostragem de 3 corpos de prova para cada idade estudada. Os rompimentos foram realizados em uma prensa de compressão da marca EMIC, modelo PC200CS, com capacidade de até 200 Mpa, como pode ser visualizada na Figura 31.

Figura 31 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autor (2019)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Abatimento de tronco de cone

Conforme prescrito na NBR NM 67 (ABNT, 1998), foi realizada a determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone (FIGURA 32). Para cada concretagem foi realizado um ensaio, sendo possível desta forma analisar a relação do abatimento pelo teor de aditivo, como pode ser visto na Tabela 10.

Figura 32 - Ensaio de abatimento de tronco de cone



Fonte: Autor (2019).

Tabela 10 - Relação Teor de aditivo/abatimento de tronco de cone

| | Teor de aditivo superplastificante (%) | Abatimento (cm) |
|-------------------------------------|---|--------------------|
| Concreto convencional | 0,4 | 12 |
| Concreto com fibra metálica | 0,6 | 18 |
| Concreto com fibra de polipropileno | 0,6 | 20 |

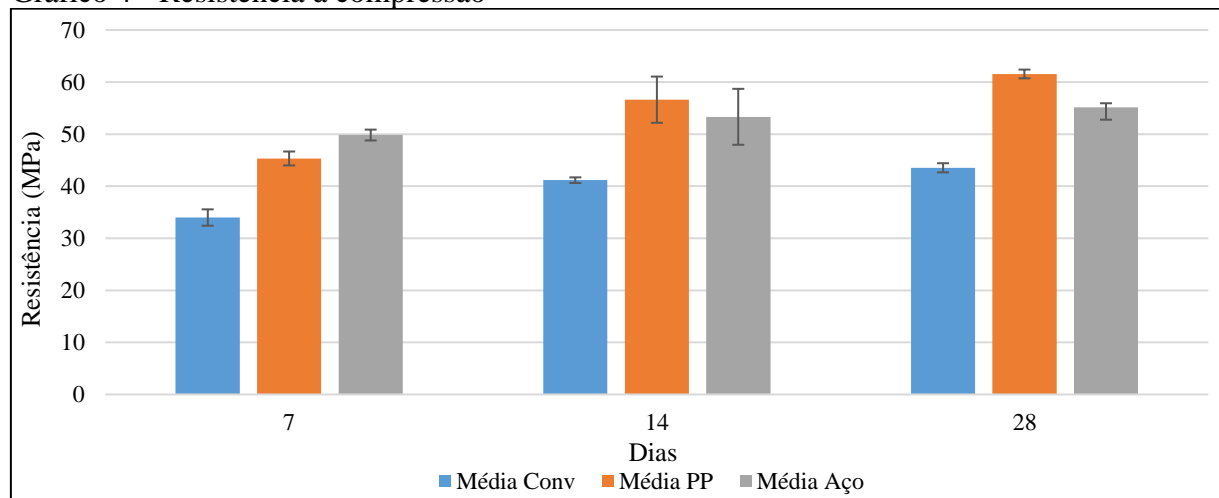
Fonte: Autor (2019)

Através da Tabela 10 é possível analisar o efeito do aditivo superplastificante no concreto e as suas variações. Com os resultados obtidos pode-se verificar que, com a adição de 0,2% em relação ao concreto convencional, ocorreram acréscimos no abatimento de 6 e 8 cm, mesmo com a condição das fibras diminuírem a trabalhabilidade do concreto. Analisando os concretos com fibras, onde foi utilizado o mesmo teor de aditivo, é possível perceber que o concreto com fibra metálica obteve um valor de abatimento menor que o concreto com fibra de polipropileno.

4.2 Resistência à compressão

Para acompanhamento do ganho de resistência à compressão do concreto, os corpos de prova foram rompidos com as idades de 7, 14 e 28 dias. No Gráfico 4 são demonstradas as médias das resistências obtidas para cada idade, além do desvio padrão calculado.

Gráfico 4 - Resistência à compressão



Fonte: Autor (2019).

Através do gráfico é possível observar que aos 7 dias o concreto com fibra metálica apresentava uma maior resistência à compressão, 25% a mais que o concreto com fibra de polipropileno e 32% a mais que o concreto convencional. Já aos 14 dias o concreto com fibra de polipropileno obteve a maior resistência, com aproximadamente 6% mais elevada que o concreto com fibra de polipropileno e 28% a mais que o convencional.

Aos 28 dias foram rompidos os últimos corpos de prova, onde o concreto com fibra de polipropileno apresentou 30% de resistência à mais que o concreto convencional e 11% quando comparado ao com fibra metálica. Observa-se que o grande ganho de resistência do concreto com a utilização de cimento CP V esteve nos 7 primeiros dias, com um ganho médio de resistência de 75%.

O estudo realizado por Amaral *et al.*, (2016) constatou que a adição de fibras de polipropileno ao concreto resulta em um aumento da resistência à compressão entre 4 e 7%. Já a adição de fibras metálicas, segundo Figueiredo (2000), quando utilizada com um teor de 40 kg/m³, pode gerar um acréscimo na resistência à compressão do concreto em torno de 5%. Ambos os concretos moldados apresentaram um ganho de resistência mais elevados do que o estimado pelos autores. Este aumento pode estar relacionado ao maior teor de aditivo utilizado nas misturas, que embora não tenha influência direta na resistência à compressão, proporciona ao concreto uma maior facilidade na moldagem dos corpos de prova. Pode-se ver nos resultados demonstrados após o ensaio de *Slump test* que o concreto com fibra de polipropileno teve o maior abatimento e o concreto convencional o menor abatimento, o que segue os resultados de compressão.

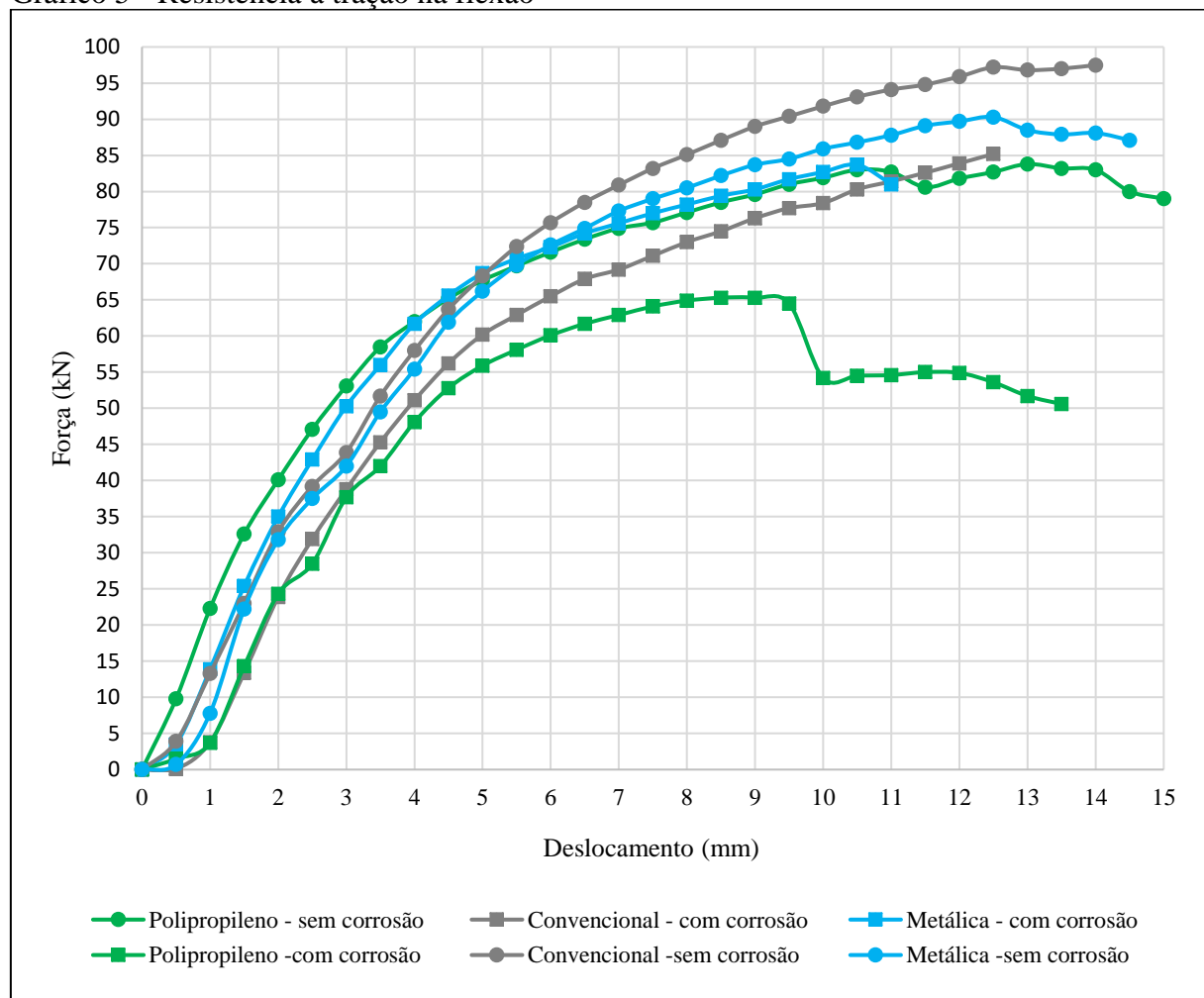
4.3 Corrosão acelerada por imersão modificada

Após 30 dias o ensaio de CAIM foi finalizado e as estruturas foram rompidas através do ensaio de flexão a 4 pontos. Em seguida realizou-se um mapeamento das fissuras e uma análise da perda de massa das barras corroídas.

4.3.1 Resistência à tração na flexão

Realizado o ensaio de flexão a 4 pontos foram elaboradas as curvas de Força x Deformação das seis vigas moldadas. No Gráfico 5 são apresentados os resultados obtidos das três vigas submetidas a corrosão e das três vigas sem corrosão.

Gráfico 5 - Resistência à tração na flexão



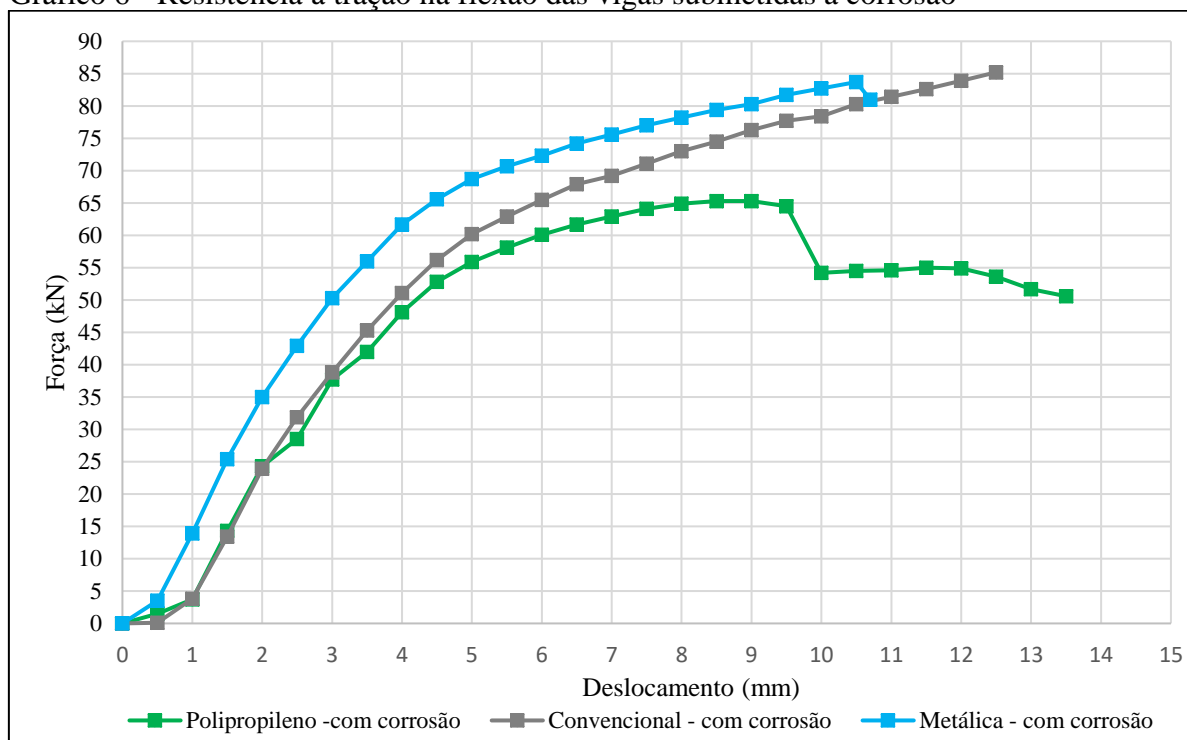
Fonte: Autor (2019).

Através do gráfico é possível verificar que todas as vigas submetidas a corrosão tiveram uma perda de resistência à tração, quando comparadas as estruturas não corroídas. Pode-se observar também que a viga que apresentou a maior resistência à tração foi a com concreto convencional, já a com pior resistência foi a reforçada com fibra de polipropileno submetida a

corrosão. Com relação ao deslocamento, observa-se que a viga de polipropileno não corroída apresentou o maior deslocamento, já o concreto reforçado com fibra metálica submetido a corrosão obteve o menor deslocamento.

Visando realizar um comparativo entre as três vigas submetidas a corrosão, foi elaborado o Gráfico 6, apresentando apenas as estruturas corroídas. Pode-se visualizar que as vigas com concreto convencional e a reforçada com fibras metálicas obtiveram uma resistência à tração de aproximadamente 85 kN e a reforçada com fibra de polipropileno obteve uma resistência máxima de 65 kN.

Gráfico 6 - Resistência à tração na flexão das vigas submetidas a corrosão



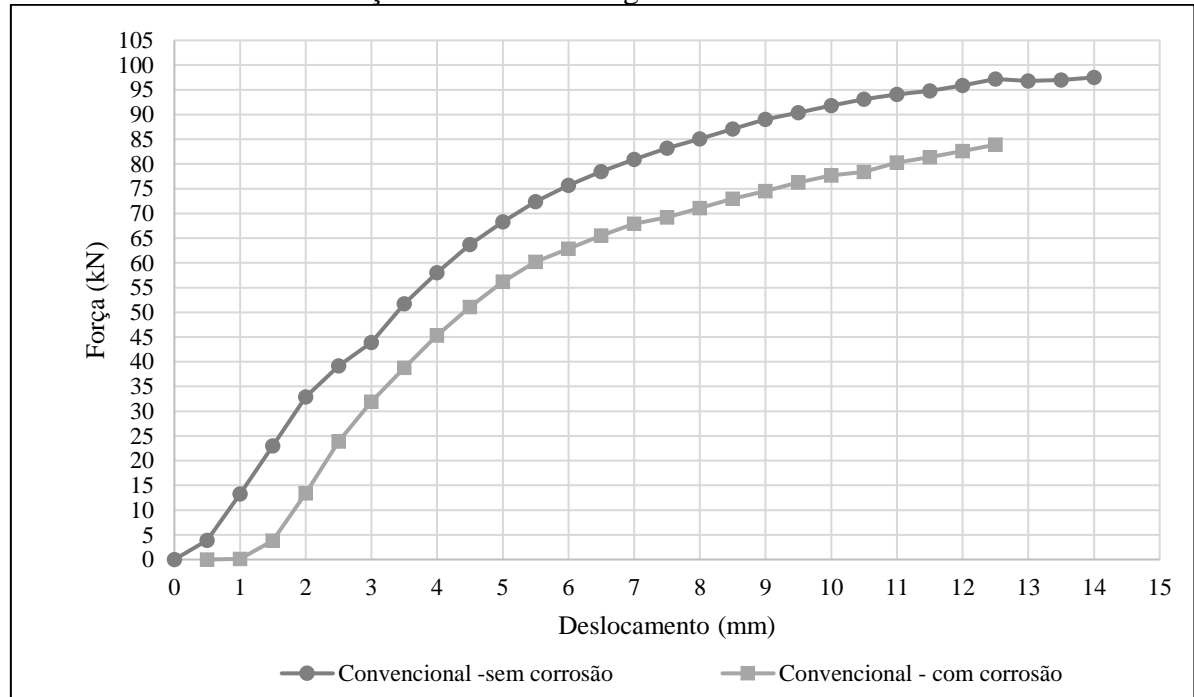
Fonte: Autor (2019).

Ainda com a análise do gráfico, é possível perceber que enquanto o concreto convencional e o reforçado com fibras metálicas tiveram um ganho de resistência durante praticamente todo o ensaio, a viga com concreto reforçado com fibra de polipropileno apresentou uma perda de resistência com o deslocamento entre 9,5 e 10 mm.

No Gráfico 7 é apresentado a curva de Força x Deslocamento do concreto convencional. Pode-se observar que mesmo após a corrosão a estrutura teve um comportamento semelhante a

viga não corroída, embora tenha apresentado um menor deslocamento e uma menor resistência à tração. Após a corrosão pode ser visto que a estrutura teve uma redução no seu deslocamento antes do rompimento de aproximadamente 10%. Já a sua resistência à flexão teve uma redução de aproximadamente 13%.

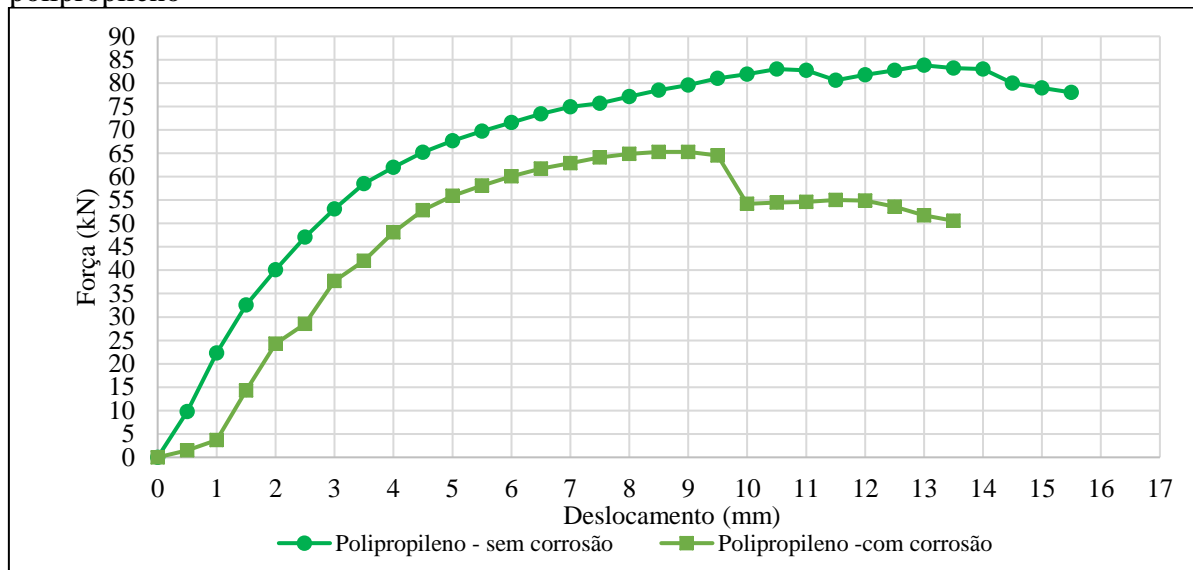
Gráfico 7 - Resistência à tração na flexão das vigas com concreto convencional



Fonte: Autor (2019).

Os comportamentos das estruturas com concreto reforçado com fibra de polipropileno, com e sem corrosão, são apresentados no Gráfico 8. Observa-se no gráfico que a estrutura corroída apresentou uma alteração em seu comportamento, tendo uma variação na curva de Força x Descolamento, com o decréscimo de 10 kN após atingir um deslocamento de 9,5mm. Com relação a resistência máxima atingida, constatou-se uma redução de 24% na viga submetida ao ensaio de CAIM. No seu deslocamento final verificou-se uma redução de 13% após a corrosão.

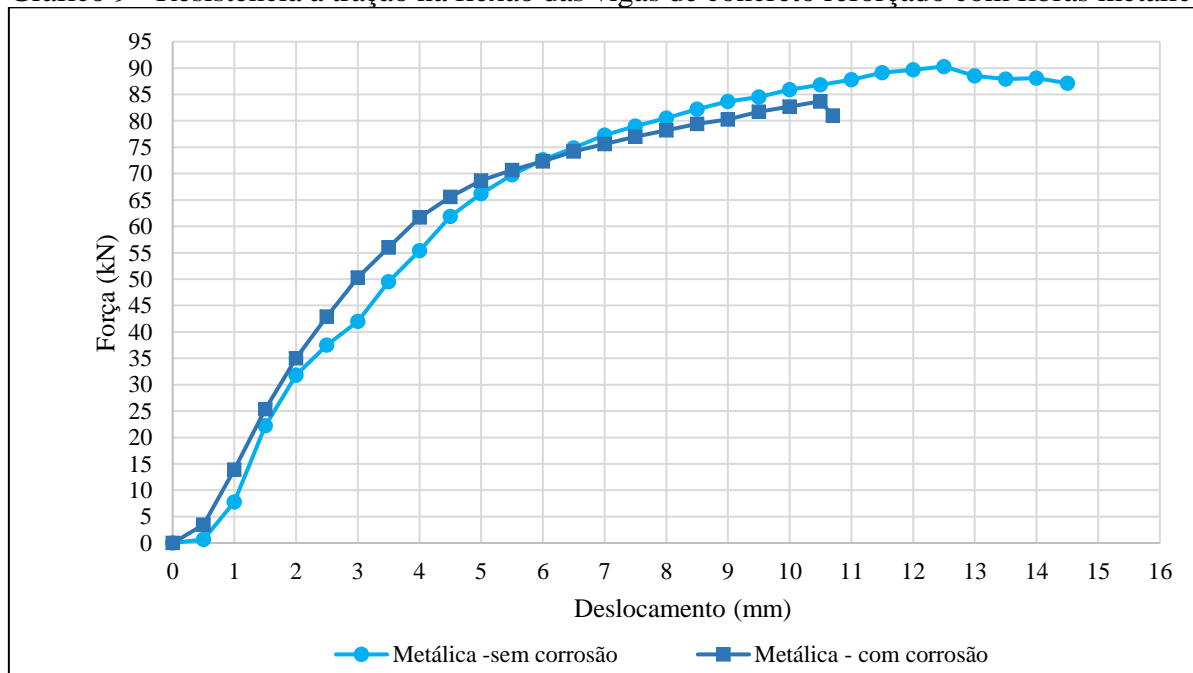
Gráfico 8 - Resistência à tração na flexão das vigas de concreto reforçado com fibras de polipropileno



Fonte: Autor (2019).

No Gráfico 9 são apresentados os comportamentos das vigas com fibra metálica, com e sem corrosão. Através da curva Força x Deformação é possível visualizar que as estruturas apresentaram comportamentos muito semelhantes, com uma pequena perda de resistência à tração de cerca de 5%. Com relação ao deslocamento máximo, observou-se uma redução de 25% na estrutura submetida a corrosão.

Gráfico 9 - Resistência à tração na flexão das vigas de concreto reforçado com fibras metálicas



Fonte: Autor (2019).

Com todos os resultados de flexão a quatro pontos obtidos, verificou-se que o concreto reforçado com fibras metálicas apresentou uma menor perda de resistência à tração. Já o concreto convencional foi o que obteve a menor redução do deslocamento.

A partir das forças geradas ao final do ensaio de flexão, calculou-se a carga de ruptura de cada viga, como pode ser visto na Tabela 11. Os resultados obtidos confirmam o concreto convencional com a maior carga de ruptura e o concreto com fibra metálica com a menor perda da carga após a corrosão. O concreto com fibra de polipropileno corroído foi o que possuiu a menor carga de ruptura. Conforme Granju e Balouch (2005) a fibra metálica tende a ter um bom desempenho à tração, mesmo após a corrosão, pois isso gera um aumento da aderência entre fibra e concreto, necessitando de maiores forças para o seu arrancamento.

Tabela 11 - Resistência à tração na flexão

| Concreto | Carga de Ruptura (MPa) |
|----------------------------------|------------------------|
| Convenciona sem corrosão | 27,73 |
| Convenciona corroído | 24,23 |
| Fibra polipropileno sem corrosão | 22,18 |
| Fibra polipropileno corroída | 14,39 |
| Fibra metálica sem corrosão | 25,05 |
| Fibra metálica corroída | 23,80 |

Fonte: Autor (2019).

Pode-se verificar nos resultados obtidos que a adição de fibras de polipropileno ao concreto resultou em uma perda de resistência à flexão, resultado contrário ao esperado. Entre os fatores que podem ter ocasionado o baixo desempenho estão o aumento do número de vazios no concreto, devido a maior dificuldade para adensar o concreto com fibras, em uma estrutura com armadura metálica, ou então uma má aderência entre a fibra de polipropileno e o concreto.

A pesquisa realizada por Berton (2019) demonstra que os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com a realização do ensaio de corrosão, com as estruturas submetidas aos ensaios tendo uma perda de resistência à flexão. Com os resultados de ambas as pesquisas, é possível verificar que a adição de fibra metálica ao concreto demonstrou comportamento semelhante a adição de 10% de cinza de casca de arroz em substituição ao cimento, com uma perda de resistência de 5% para o concreto com fibra metálica e 3,3% para o concreto com cinza de casca de arroz.

Através dos estudos realizados por Stein (2016), é possível verificar também o bom desempenho dos traços moldados. Em sua pesquisa, com um concreto convencional, com relação água/cimento de 0,66, resistência à compressão de 25 MPa, após aproximadamente 30 dias de ensaio, o autor obteve uma diminuição na carga de ruptura em torno de 50%. Assim destaca-se principalmente a pequena perda de resistência do concreto convencional elaborado, que com uma relação água/cimento de 0,4 e resistência à compressão de 45 Mpa, teve uma perda de resistência à flexão de 13%.

4.3.2 Mapeamento das fissuras

Após os ensaios de resistência à tração na flexão, realizou-se uma análise da fissuração das vigas. Nas figuras 33 a 38 são apresentadas as 6 vigas moldadas, após o ensaio de flexão. Pode-se visualizar que as fissuras surgiram em sua grande maioria como padrão no terço médio do vão, característica de rupturas oriundas da flexão e com direção perpendicular a armadura longitudinal.

Figura 33 - Concreto convencional sem corrosão



Fonte: Autor (2019).

Figura 34 - Concreto convencional com corrosão



Fonte: Autor (2019).

Figura 35 - Concreto com fibra de polipropileno sem corrosão



Fonte: Autor (2019).

Figura 36 - Concreto com fibra de polipropileno com corrosão



Fonte: Autor (2019).

Figura 37 - Concreto com fibra de aço sem corrosão



Fonte: Autor (2019).

Figura 38 - Concreto com fibra de aço com corrosão

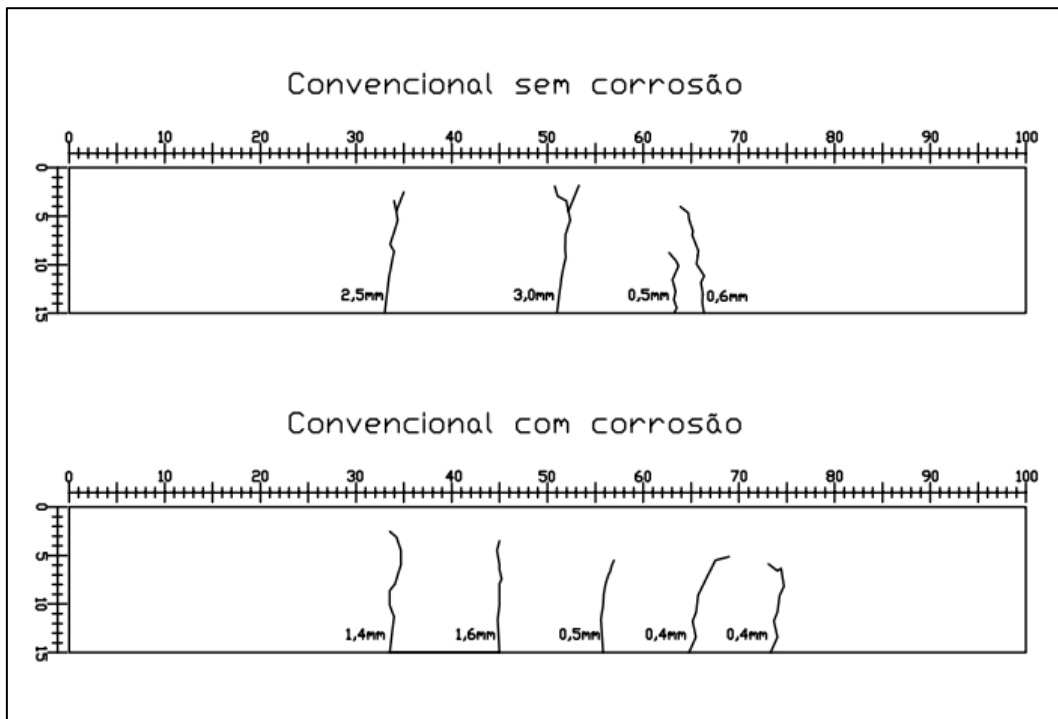


Fonte: Autor (2019).

Com a utilização de um fissurômetro e de uma régua, foi realizado o levantamento das espessuras e da localização das fissuras. Com estas informações foi realizado o mapeamento das fissuras. Os resultados são expostos nas Figuras 39 a 41.

Na Figura 39 é apresentado o mapeamento das vigas moldadas com concreto convencional, sem e com corrosão. É possível visualizar que quando submetida a corrosão a estrutura apresentou as mesmas característica de fissuras, no seu terço médio, porém surgindo em uma maior quantidade, mas com menor espessura.

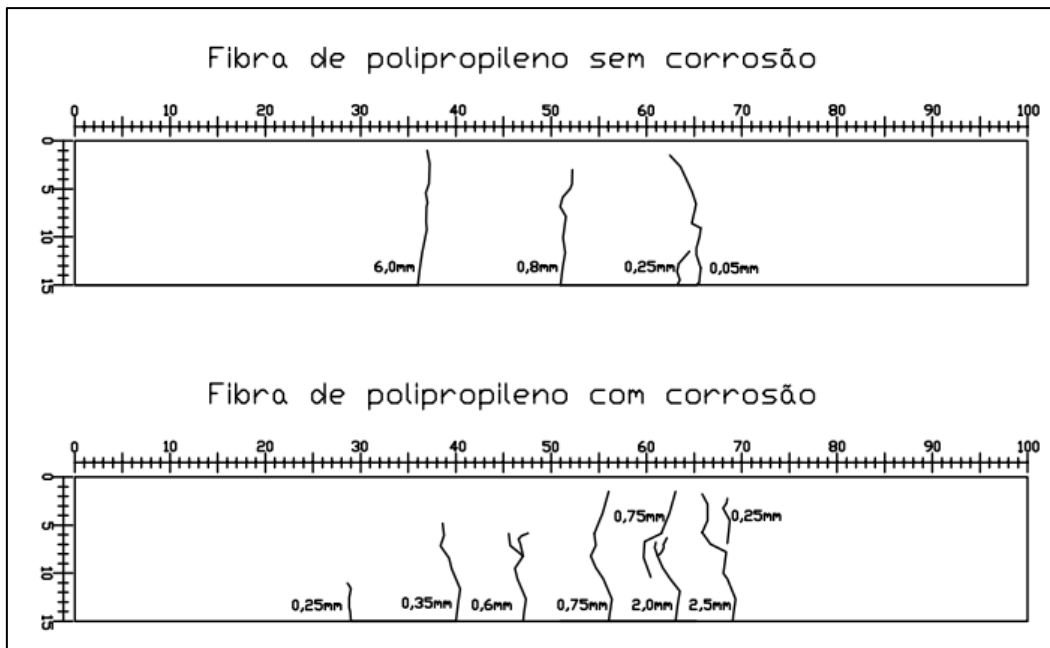
Figura 39 - Mapeamento de fissuras - concreto convencional



Fonte: Autor (2019).

Na Figura 40 pode ser visto o mapeamento da fissuração do concreto reforçado com fibras de polipropileno, sem e com corrosão. Desta forma percebe-se que as fissuras se mantiveram no terço médio do vão, com as mesmas características. É possível ainda perceber que após o ensaio de CAIM a estrutura apresentou uma maior abertura de fissuras, com espessuras variadas.

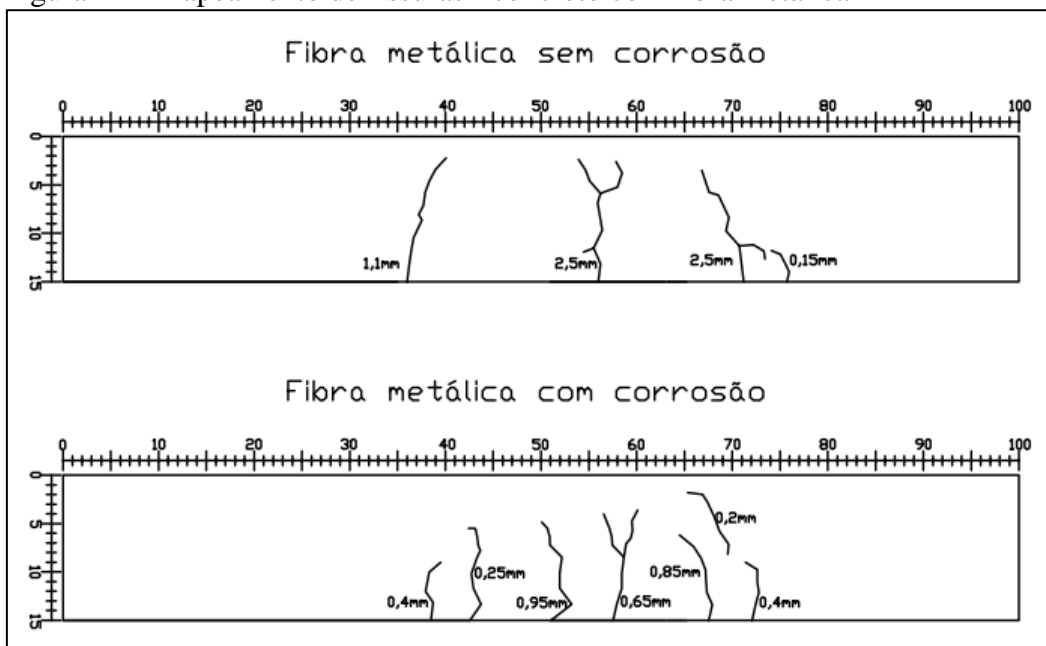
Figura 40 - Mapeamento de fissuras - concreto com fibra de polipropileno



Fonte: Autor (2019)

Através da Figura 41, é possível ver o comportamento do concreto com fibras metálicas. Após o ensaio de corrosão ocorreu um aumento da fissuração e uma redução de suas espessuras. Na figura ainda pode-se observar que a localização das fissuras continuou de forma semelhante em ambas as estruturas.

Figura 41 - Mapeamento de fissuras - concreto com fibra metálica



Fonte: Autor (2019).

De forma geral, pode-se constatar que após o ensaio de corrosão, em todos os concretos as fissuras permaneceram com localização semelhantes as estruturas não corroídas. Também foi possível verificar em todos os casos um aumento do número de fissuras, mas com menores espessuras. Realizando um comparativo entre os diferentes tipos de concretos corroídos, pode-se perceber um maior número de fissuras nos concretos reforçados com fibras, ocorrendo com maiores espessuras no concreto com fibra de polipropileno.

4.3.3 Perda de massa

Visando verificar a perda de massa das armaduras, foi removido o concreto de cobertura das três vigas submetidas a corrosão, como pode ser visto nas figuras 42 a 44. Desta forma pode-se observar que a corrosão atingiu todas as barras negativas das estruturas e a parte inferior dos estribos.

Figura 42 – Armadura do concreto convencional após a corrosão



Fonte: Autor (2019).

Figura 43 - Armadura do concreto com fibra de polipropileno após a corrosão



Fonte: Autor (2019).

Figura 44 - Armadura do concreto com fibra metálica após a corrosão



Fonte: Autor (2019).

Após a remoção do concreto as armaduras foram limpas e com a utilização de um paquímetro foi verificado o diâmetro das barras longitudinais, desta forma foi possível verificar a perda de seção da armadura. Para cada barra analisada foram realizadas 10 leituras. Na Tabela 12 é possível verificar a perda de seção média das armaduras.

Tabela 12 - Perda de seção média das barras

| Barra - Concreto | Corrosão média |
|-------------------------|----------------|
| Barra 1 - Convencional | 5,38% |
| Barra 2 - Convencional | 4,75% |
| Barra 1 - Polipropileno | 4,25% |
| Barra 2 - Polipropileno | 4,33% |
| Barra 1 - Metálica | 4,15% |
| Barra 2 - Metálica | 3,88% |

Fonte: Autor (2019).

Através da tabela é possível verificar que a armadura do concreto convencional teve uma maior perda de seção quando comparadas aos concretos reforçados com fibras. Entre os concretos com fibras pode-se ver que a adição de fibra metálica teve uma perda de seção levemente inferior em relação ao concreto reforçado com fibra de polipropileno. Todos os resultados ficaram dentro da margem estipulada inicialmente de 10% de perda de seção.

Além da perda de seção, foi realizado uma análise do avanço da corrosão nos estribos. Nas Figuras 45 a 47 podem ser vistas as armaduras das três vigas submetidas ao ensaio de CAIM.

Figura 45 - Avanço da corrosão - Concreto convencional



Fonte: Autor (2019).

Figura 46 - Avanço da corrosão - Concreto com fibra de polipropileno



Fonte: Autor (2019).

Figura 47 - Avanço da corrosão - Concreto com fibra metálica



Fonte: Autor (2019).

Constatou-se um avanço médio no estribo de 3,12 cm no concreto convencional, 4,05 cm no concreto com fibra de polipropileno e de 2,96 cm no concreto convencional. Assim como na perda de seção, a adição de fibra metálica ao concreto foi a que apresentou melhores resultados, o que justifica a menor perda de resistência à tração.

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões mais relevantes obtidas após a análise dos resultados, a fim de demonstrar a realização dos objetivos desta pesquisa e o alcance de seus resultados.

Com a adição de fibras ao concreto foi possível observar comportamentos distintos entre a fibra de polipropileno e a fibra metálica. Quando submetidas a um esforço de tração, as vigas com a adição de fibra metálica demonstraram uma perda de resistência de 5%, já a adição de fibra de polipropileno resultou em uma perda de 24%, perda maior até mesmo que o concreto convencional, que apresentou uma perda de 13% de resistência. O melhor desempenho da fibra metálica na resistência à tração se deve a maior aderência entre a fibra e o concreto, pois após o início da corrosão a fibra metálica tende a ter uma leve expansão, aumentando a aderência entre os materiais, necessitando de uma força mais elevada para o seu arrancamento.

O melhor desempenho à tração da fibra metálica também é justificado quando analisada a perda de massa das barras. Enquanto a viga com fibra metálica apresentou uma perda de seção de 4,15% e 3,88%, o concreto convencional obteve 5,38% e 4,75% e o concreto com fibra de polipropileno resultou em 4,25% e 4,33%. Neste caso, as adições dos dois tipos de fibras demonstraram resultados melhores em relação ao concreto convencional, embora os resultados estejam muito próximos.

Através do mapeamento das fissuras das estruturas rompidas, pode-se observar que após a corrosão as vigas apresentaram uma maior fissuração. O baixo desempenho à tração do

concreto com fibra de polipropileno pode ser visto com este mapeamento, pois foi o concreto com a maior quantidade de fissuras e as maiores espessuras. Já a adição de fibra metálica ao concreto, comparado ao concreto convencional, resultou em um maior número de fissuras, porém com menores espessuras.

Em relação a resistência a corrosão, mesmo mantendo-se as mesmas quantidades de cimento, brita e água, a adição de fibras ao concreto resultou em um ganho de resistência. Entre as três concretagens realizadas, a adição de fibra de polipropileno foi a que apresentou a maior resistência, com 11% a mais do que o concreto com fibra metálica e 41% a mais do que o concreto convencional.

Por fim, considera-se que o ensaio Corrosão Acelerada por Imersão Modificada demonstrou eficiência na aceleração da corrosão, visto que em todas as análises feitas, as estruturas submetidas ao ensaio demonstraram resultados inferiores as estruturas que permanecerem em uma condição ambiente.

REFERÊNCIAS

AGUIAR. José Eduardo de. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós graduação em Construção Civil – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

AITCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. Trad. Geraldo G. Serra. São Paulo: Pini, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 15530**: Fibras de aço para concreto - Especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. **NBR NM 53**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 15900 -1**: Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 12142**: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 15575**: Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

AMARAL, Josué Coelho; SILVA, Luiza Caroline Ferreira; MORAVIA, Weber Guadagnin. **Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto.** Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rmat/v22n1/1517-7076-rmat-22-01-e11780.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2019.

BATTISTI, Fernando. **Recuperação de vigas em concreto armado utilizando polímero reforçado com fibras de carbono.** Monografia (Graduação), Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari -UNIVATES, Lajeado, 2017.

BAUER, Luiz Alfredo F. **Materiais de construção.** 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BENTUR A., MINDESS S. **Fibre Reinforced Cementious Composites.** Elsevier Applied Science, London and New York, 1990.

BENTUR, A; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composite.** 2. ed. London: Elsevier, 2007.

BERTON, Júlia Giordani. **Análise do comportamento mecânico de vigas de concreto armado com adição de materiais pozolânicos submetidas à corrosão acelerada.** Monografia (Graduação), Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, Lajeado, 2019.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos; MARCHETTI, Osvaldemar. **Concreto armado eu te amo.** 8. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

CASCUDO, Oswaldo. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas.** 1ª ed. Goiânia: Editora UFG, 1997.

CAVALCANTI FILHO, A. N. **Contribuição ao controle tecnológico de concretos estruturais de cimento Portland em ambientes marítimos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

COSTA, Rodrigo Moysés. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

FIGUEIREDO. Antônio Domingues de. **Concreto com fibras de aço.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP. São Paulo, 2000.

FIGUEIREDO. Antônio Domingues de. **Concreto Reforçado com fibras.** Tese (Doutorado em Materiais e Componentes de Construção Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP. São Paulo, 2011.

GARCEZ, E. O. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto.** Dissertação (Mestrado – Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GRAEFF, Ângela G. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, 2007.

GUIMARÃES, D. **Pisos industriais em concreto: determinação de teores ótimos de fibras de aço e polipropileno em ensaios mecânicos.** Monografia (Graduação Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2010.

ISAIA, Geraldo C. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** Ibracon, São Paulo, 2011.

MEDEIROS, Arthur. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Pontifica Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2012.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, Paulo. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** 2ª Ed. São Paulo, IBRACON, 2014.

POGGIALI, Flávia. **Durabilidade de estruturas de concreto em usinas siderúrgicas.** Monografia (Especialização em Construção Civil), Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2009.

POLITO, Giulliano. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação.** Monografia (Aperfeiçoamento / Especialização em Construção Civil), Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de construção civil.** 2ª ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2002.

SACILOTO, Adriano P. **Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura.** 2005. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SANTOS, Maurício. **Deterioração das estruturas de concreto armado – estudo de caso.** Monografia (Especialização em Construção Civil), Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte, 2012.

SILVA, D. R. **Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado, visando à melhoria na sua durabilidade.** Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, 2006.

STEIN, Kássio J. **Avaliação experimental dos efeitos combinados de corrosão e fadiga em vigas de concreto armado.** Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2016.

TORRES, A. S; GUIMARÃES, D; SILVA FILHO, L.C.P. **Ensaio CAIM para corrosão acelerada em corpos de prova de concreto armado – Ensaio de curta duração.** Artigo científico. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

TORRES, Ariela. **Avaliação da sensibilidade do ensaio CAIM - Corrosão por Acelerada por Imersão Modificada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, 2006.

TUUTTI, K. **Corrosin of Steel in Concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, Suecis, 1982.



UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil

CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000

www.univates.br | 0800 7 07 08 09